

Masterarbeit

Ressourcenschutz in der hessischen Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Phosphor

verfasst

von

Andreas Höhne

Referentin: Prof. Dr. Ursula Katharina Deister

Koreferent: Dr. Thomas Schmid

In Kooperation mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Abgabetermin: 30.09.2014

Inhaltsverzeichnis

1. Zielstellung	10
2. Einführung in das Thema.....	11
3. Das Element Phosphor	13
3.1. Weltweite Vorkommen	13
3.2. Förderung und Preisentwicklung von Rohphosphat.....	14
3.3. Verwendung von Phosphor.....	17
3.4. Notwendigkeit des Ressourcenschutzes und der Phosphor-Rückgewinnung	19
3.4.1. Ökologische Auswirkungen	19
3.4.2. Gesundheitliche Auswirkungen.....	20
3.4.3. Geopolitische Aspekte.....	23
3.4.4. Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm.....	23
3.5. Politische Entwicklungen auf EU-Ebene.....	26
3.6. Potentielle phosphorhaltige Abfälle	26
4. Möglichkeiten zur Nutzung des Phosphorgehalts tierischer Nebenprodukte	28
4.1. Situation in Hessen.....	30
4.2. Bundesweite Betrachtung.....	31
4.3. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Tiermehl	32
5. Stand der Verwertung von Bioabfall und P-Nutzung in Hessen.....	33
5.1. Aufkommen und Phosphorgehalt von Bio- und Grünabfällen.....	33
5.2. Erfassung von Bio- und Grünabfällen.....	35
5.3. Verwertung und Verbleib von Bio- und Grünabfall	36
5.4. Potential Bioabfälle	39
5.5. Empfehlungen zur Optimierung der Bioabfallererfassung.....	42
6. Befragung von Kläranlagen und Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Hessen	46
6.1. Art, Anzahl und Ausbaugröße der Kläranlagen in Hessen.....	46
6.1.1. Betrachtung der zu entsorgenden Stoffe	48
6.2. Auswertung der Befragung der Kläranlagen	49
6.2.1. Ergebnisse bezüglich der Betriebsweise	49
6.2.2. Ergebnisse zur Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase.....	50
6.2.3. Ergebnisse zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm	51
6.3. Auswertung der Befragung der Klärschlammverbrennungsanlagen	52
7. Auswahl der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren und Bewertungssystem	53

7.1. Einsatzstellen zur Phosphor-Rückgewinnung in kommunalen Kläranlagen	53
7.2. Bewertungskriterien.....	56
7.2.1. Verfahrensstruktur.....	56
7.2.2. Phosphor-Rückgewinnungspotential	57
7.2.3. Produkteigenschaft (Pflanzenverfügbarkeit)	57
7.2.4. Wirtschaftlichkeit	58
7.2.5. Ökologische Bewertung	58
7.3. Auswahl der Verfahren und Bewertungssystem.....	58
8. Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase	60
8.1. Grundlagen der Phosphat-Elimination aus der flüssigen Phase	60
8.1.1. Chemisch-physikalische Phosphatfällung	61
8.1.2. Die biologische Phosphat-Elimination.....	62
8.2. Effizienz und Phosphor-Rückgewinnungspotential.....	64
8.3. Beschreibung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase.....	66
8.3.1. Ostara PEARL [®]	66
8.3.2. P-RoC	67
8.3.3. DHV Crystalactor [®]	69
8.3.4. PRISA	70
8.3.5. REM NUT [®] -Ionenaustauschverfahren	71
8.3.6. Nicht bewertete Verfahren (PHOSIEDI und RECYPHOS)	72
8.4. Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase	73
8.4.1. Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien	74
8.4.2. Zusammenfassung der Bewertung.....	78
8.5. Punktevergabe und Diskussion	80
9. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm	83
9.1. Klärschlammaufkommen und Phosphor-Rückgewinnungspotential.....	85
9.2. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm	85
9.2.1. FIX-Phos.....	85
9.2.2. Stuttgarter Verfahren.....	88
9.2.3. AirPrex [®] MAP-Verfahren	90
9.2.4. Gifhorner Verfahren.....	93
9.2.5. Mephrec [®]	95
9.2.6. Nicht bewertete Verfahren (PYREG und Budenheimer Verfahren).....	97
9.3. Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm.....	100
9.3.1. Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien	100

9.3.2. Zusammenfassung der Bewertung.....	105
9.4. Punktevergabe und Diskussion	106
9.5. Untersuchung der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche	110
10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche	112
10.1 Aufkommen und Phosphor-Rückgewinnungspotential	113
10.2. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen.....	114
10.2.1 LEACHPHOS®	114
10.2.2. Projekt: PASCH	115
10.2.3. SESAL-Phos Verfahren	117
10.2.4. ASH DEC®	118
10.2.5. RecoPhos®	119
10.2.6. Nicht bewertete Verfahren (Bioleaching und BioCon).....	121
10.3. Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche.....	123
10.3.1. Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien	123
10.3.2. Zusammenfassung der Bewertung.....	128
10.4. Punktevergabe und Diskussion	129
11. Ausblick	132
11.1. Arbeiten der LAGA und Beschlüsse der Umweltministerkonferenz	132
11.2. Stand der Forschung in Deutschland	133
11.3. Projekte und Studien einzelner Bundesländer.....	135
11.4. Förderprogramme	136
12. Zusammenfassung.....	137
13. Abschlussdiskussion und Schlussfolgerung.....	138
14. Literaturverzeichnis.....	143
15. Anhang	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Weltweite Phosphorreserven (U.S. Geological Survey, 2014).....	14
Tabelle 2 - Minenproduktion der jeweiligen Staaten (U.S. Geological Survey, 2014)	14
Tabelle 3 - Einsatz von Phosphor in Deutschland pro Jahr, untergliedert in Branchen (Schätzungen des Umweltbundesamts) (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012).....	18
Tabelle 4 - Schwermetallgehalte von Rohphosphaten im Hinblick auf die Herkunft (Dittrich, et al., 2008)	20
Tabelle 5 - Schwermetallgehalte in Phosphatdüngern (Dittrich, et al., 2008).....	20
Tabelle 6 - Grenzwerte für den Düngemiteleinsatz (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2008) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1992) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1998)	21
Tabelle 7 - Urangehalt in unterschiedlichen Düngemitteln ($U_{ges} = U_{238}$ und U_{235}) (Umweltinstitut München e.V., 2012).....	22
Tabelle 8 - Verwendung der tierischen Nebenprodukte der Kategorien 1 – 3 im Jahr 2010 (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012).....	31
Tabelle 9 - Phosphor-Potential bezogen auf die angefallene Masse im Jahr 2010 (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012).....	31
Tabelle 10 - Zusammenfassung der Werte des Bio- und Grünabfallaufkommens 2012 (gerundete Werte)	33
Tabelle 11 - Gehalt an Phosphor in organischen Düngemitteln (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.)	34
Tabelle 12 - Nährstoffgehalte organischer Düngemittel (Bernhard, 2012)	34
Tabelle 13 - Bilanzierung der P-Potentiale im Bioabfall.....	42
Tabelle 14 - Anzahl der hessischen kommunalen Kläranlagen und deren Ausbaugröße (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)	46
Tabelle 15 - Aufkommen und Entsorgung von Abfällen aus kommunalen Kläranlagen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013).....	48
Tabelle 16 - Vergleich der möglichen Einsatzorte bezüglich Massenfluss und P-Konzentration (Egle, et al., 2014).....	54
Tabelle 17 - Rückgewinnungspotentiale von Klärschlamm (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)	55
Tabelle 18 - Bewertungssystem der P-Rückgewinnungsverfahren.....	59
Tabelle 19 - Kostenabschätzung P-RoC Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)	68
Tabelle 20 - Kostenabschätzung PRISA Verfahren (Montag, 2008)	71
Tabelle 21 - Darstellung der wesentlichen Bewertungskriterien der P-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase (Egle, et al., 2014).....	78
Tabelle 22 – Abschließende Bewertung der P-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase mittels Punktevergabe	80
Tabelle 23 - Kostenabschätzung FIX-Phos Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)	87
Tabelle 24 - Produkterträge - Stuttgarter Verfahren (Steinmetz, et al., 2014).....	89
Tabelle 25 - Kostenabschätzung - Stuttgarter Verfahren (Steinmetz, et al., 2014)	89
Tabelle 26 – Kostenabschätzung: Investitionskosten und Erlös für AirPrex® MAP-Verfahren (Ewert, 2009)	92
Tabelle 27 - Kostenabschätzung Gifhorner Verfahren (Hermanussen, et al., 2012)	95

Tabelle 28 - Kostenabschätzung Mephrec® Verfahren (Scheidig, 2009)	96
Tabelle 29 - Zusammenfassende Darstellung der Bewertung (Egle, et al., 2014)	105
Tabelle 30 - Abschließende Beurteilung der P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm mittels Punktevergabe	107
Tabelle 31 – Kostenabschätzung PASCH Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011).....	116
Tabelle 32 - Kostenabschätzung SESAL-Phos Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)	117
Tabelle 33 - Darstellung der Entfrachtung und des Verbleibs der Schwermetalle (Egle, et al., 2014)	127
Tabelle 34 - Darstellung der Entfrachtungsleistung hinsichtlich einzelner Schwermetalle (Egle, et al., 2014)	127
Tabelle 35 - Zusammenfassung der Bewertung der Rückgewinnungsverfahren aus Asche (Egle, et al., 2014)	128
Tabelle 36 - Abschließende Beurteilung der P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche mittels Punktevergabe	129
Tabelle 37 - Zusammenfassung der führenden Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium...	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Preisentwicklung Rohphosphat (indexmundi, 2014).....	16
Abbildung 2 - Preisentwicklung Rohphosphat parallel zu Weizen (indexmundi, 2014)	17
Abbildung 3 - Abschätzung des prozentualen Phosphoreinsatzes in Deutschland (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012).....	18
Abbildung 4 - Phosphorpotential der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland (Fricke, et al., 2003)	27
Abbildung 5 - Bundesweite Betrachtung der spezifischen Erfassung von Bio- und Grünabfällen (M. Kern, 2012).....	34
Abbildung 6 - Behandlung der Bioabfälle in den jeweiligen öRE (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013).....	38
Abbildung 7 - Behandlungsart der Grünabfälle in den jeweiligen öRE (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013).....	39
Abbildung 8 - Durchschnittlicher Anteil der Bioabfälle im Restmüll (Wiemer, et al., 2014)	40
Abbildung 9 - Zusammensetzung der nativen Organik im Restmüll (Wiemer, et al., 2014).....	41
Abbildung 10 - Aktuelle Verfahrensweise (Reinigungsart) der hessischen Kläranlagen eingeteilt nach Größenklassen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013).....	47
Abbildung 11 - Jahresablauffrachten Pges in [t/Jahr] aus hessischen Kläranlagen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)	47
Abbildung 12 - Einsatzstellen zur P-Rückgewinnung in kommunalen Kläranlagen (Egle, et al., 2014)	54
Abbildung 13 - Bekannte Verfahren zur P-Rückgewinnung (Pinnekamp, 2013)	56
Abbildung 14 –Biologische P-Elimination (Barjenbruch, et al., 2009)	64
Abbildung 15 - P-Rückgewinnungspotential aus der wässrigen Phase für Kläranlagen ohne Fällung und Bio-P (Petzet, et al., 2010).....	65
Abbildung 16 - P-Rückgewinnungspotential aus Schlammwasser für Kläranlagen mit Fällung und Bio-P (Petzet, et al., 2010)	65
Abbildung 17 - Schematische Darstellung des PEARL® Nutrient Recovery Process (Gethke-Albinus, 2012)	66
Abbildung 18 - Schematische Darstellung des P-RoC Verfahrens (KIT - Karlsruher Institut für Technologie, 2013).....	68
Abbildung 19 - Verfahrensschema DHV Crystalactor® (Von Horn, et al., 2010).....	69
Abbildung 20 - Schematische Darstellung des PRISA-Verfahrens (Montag, 2008).....	70
Abbildung 21 - Darstellung der am besten geeigneten Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium	79
Abbildung 22 - Schematische Darstellung des FIX-Phos-Verfahrens (Pinnekamp, et al., 2011).....	86
Abbildung 23 - Verfahrensschema Stuttgarter Verfahren (Preyl, 2012).....	89
Abbildung 24 - Verfahrensschema AirPrex® MAP-Verfahren (Pollution Control Service GmbH (P.C.S.), 2010)	91
Abbildung 25 - Fließbild Seaborne-Verfahren (Hermanussen, et al., 2012)	94
Abbildung 26 - Fließbild Gifhorner-Verfahren (Hermanussen, et al., 2012).....	95
Abbildung 27 - Schematische Darstellung des PYREG-Verfahrens (PYREG GmbH)	97
Abbildung 28 - Schematische Darstellung des Budenheimer Verfahrens (Stössel, 2014).....	99

Abbildung 29 - Darstellung der besten Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm für das jeweilige Bewertungskriterium	106
Abbildung 30 - Schematische Darstellung des LEACHPHOS® Verfahrens (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013)	115
Abbildung 31 - Verfahrensschema PASCH-Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)	116
Abbildung 32 - Verfahrensschema ASH DEC® (ASH DEC Umwelt AG, 2008)	119
Abbildung 33 - Verfahrensprinzip des InduCarb-Reaktors (Universität Loeben).....	121
Abbildung 34- Schematische Übersicht des Bio-Con-Verfahrens (Von Horn, et al., 2010)	122
Abbildung 35 - Darstellung der besten Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche für das jeweilige Bewertungskriterium	128
Abbildung 36 - Verfahren mit der höchsten Gesamtpunktzahl	140

Glossar

ADP:	Adenosindiphosphat
ATP:	Adenosintriphosphat
MAP:	Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit)
DAP:	Diammoniumphosphat
CaP:	Calciumphosphate
FeP:	Eisenphosphate
Bioabfälle:	Über die Biotonne erfasste Küchenabfälle bei anteiliger Miterfassung von Gartenabfällen (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008)
Grünabfälle:	Über separate Sammelsysteme erfasste Pflanzenreste wie Gras-, Strauch- und Baumschnitt (ohne Vermischung mit nassen Küchenabfällen) (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008)
Restabfall:	verbleibender Abfall nach Entzug der Wertstoffkomponenten (Verein Deutscher Ingenieure, 2003); i.A. Abfall, der über die grauen Restmülltonnen entsorgt wird
Hausmüll:	alle Abfälle aus privaten Haushalten und Ladengeschäften, die von beauftragten Dritten oder von den Entsorgungspflichtigen selbst regelmäßig gesammelt, transportiert und der weiteren Entsorgung zugeführt werden (Verein Deutscher Ingenieure, 2006)
Frischkompost:	Kompost in Rotte (Rottegrad II oder III) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1998)
Fertigkompost:	hygienisierter, biologisch stabilisierter Kompost (Rottegrad IV oder V) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1998)
DüMV:	Düngemittelverordnung - Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln
AbfklärV:	Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 12 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
KrWG:	Kreislaufwirtschaftsgesetz - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324)
Mg:	Megagramm; entspricht einer Tonne
Mt:	Megatonne; entspricht 1 Mio. Tonnen
BMBF:	Bundesministerium für Bildung und Forschung

EW:	Einwohnerwert (früher EWG); entspricht der täglich von einem Einwohner in das Abwasser abgegebenen Menge an organischen Verbindungen
TS:	Trockensubstanzgehalt
TM:	Trockenmasse; die Masse des Klärschlammes ohne Wasseranteil
örE:	öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger
BMUB:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
UBA:	Umweltbundesamt
LABO:	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAWA:	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
UFOPLAN:	Umweltforschungsplan

1. Zielstellung

Phosphor (P) ist eine limitierte Ressource, die v.a. in der Düngemittel- und Lebensmittelindustrie von besonderer Bedeutung ist. Die aktuellen Entwicklungen in der Politik, wie der geplante Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung oder der Entwurf einer Phosphor-Rückgewinnungsverordnung (Roskosch, et al., 2014), zeigen deutlich, dass die Bestrebungen zum Schutz bzw. zur Rückführung von Phosphor in den Nährstoffkreislauf verstärkt werden. Seit einigen Jahren wird intensiv an einer Phosphor-Strategie gearbeitet, die sich u.a. mit den vorhandenen Phosphor-Potentialen und den Phosphor-Rückgewinnungsverfahren auseinandersetzt. In verschiedenen Stoffströmen ist zum Teil mit erheblichen Potentialen zu rechnen, die teilweise ungenutzt dem Kreislauf verloren gehen. Die Wertschöpfung und Rückgewinnung ist nicht nur mit neuen Herausforderungen, sondern auch mit der Chance auf Nachhaltigkeit und Unabhängigkeit von der Ressource Phosphor, verbunden.

In Kooperation mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) verfolgt die Masterarbeit das Ziel, speziell für Hessen das vorhandene Phosphor-Potential in verschiedenen Stoffströmen wie tierische Nebenprodukte, Bioabfälle, Abwasser, Klärschlamm und Klärschlamm-Asche zu untersuchen und den aktuellen Stand der Maßnahmen zur Wertschöpfung bzw. Rückgewinnung von Phosphor aufzuzeigen. Für die Datenerhebung werden u.a. Befragungen von Betrieben, Kläranlagen und Klärschlammmonoverbrennungsanlagen durchgeführt.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei in der Beschreibung und Bewertung unterschiedlicher Phosphor-Rückgewinnungsverfahren, die aufgrund der derzeitigen Erfahrungswerte und des technischen Entwicklungsstands, ein hohes Potential zur Umsetzung in einer längerfristigen Phosphor-Strategie besitzen. Dabei werden die Verfahren anhand von fünf wesentlichen Bewertungskriterien wie Verfahrensstruktur, Phosphor-Rückgewinnungspotential, Produkteigenschaft, Wirtschaftlichkeit und ökologische Bewertung, untersucht und mithilfe eines Punktesystems bewertet. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, welche Rückgewinnungsverfahren für welches Kriterium am besten geeignet ist. Abschließend erfolgt eine Zusammenstellung des derzeitigen Stands der Forschung bezüglich Rückgewinnungsmaßnahmen und möglicher Förderinitiativen.

Die Masterarbeit soll als Hilfestellung für die politischen Entscheidungsträger dienen, die zur Erstellung einer Phosphor-Strategie für Hessen beitragen kann. Anhand der gewonnenen Ergebnisse können, je nach Anforderung und Schwerpunktsetzung, die Verfahren gewählt werden, die mithilfe verfügbarer Förderinitiativen oder Demonstrationsprojekten in hessischen Kläranlagen und Klärschlammmonoverbrennungsanlagen implementiert und erprobt werden. Die daraus resultierenden Erfahrungswerte liefern einen Beitrag zur Verbesserung, Weiterentwicklung und schließlich zur flächendeckenden großtechnischen Umsetzung der besten Verfahren.

2. Einführung in das Thema

Bereits im Jahr 1959 wies der Biochemiker und Science-Fiction-Schriftsteller Isaac Asimov in seinem Essay „Life's Bottleneck“ darauf hin, dass Phosphor ein nicht substituierbares Element ist. Ein stetiges Wachstum auf der Erde ist nur mithilfe von Phosphor möglich. Sind die Vorkommen erschöpft, hat dies weitreichende Folgen. (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2013)

Nicht nur für Menschen ist Phosphor ein essentielles Spurenelement, sondern auch Pflanzen benötigen Phosphate zum Aufbau der Zellstrukturen. Neben Stickstoff und Kalium zählt Phosphor zu den wichtigsten Hauptnährstoffen der Pflanzen, weswegen der bedeutendste Anwendungsbereich von Phosphor in der Düngemittelproduktion liegt. Die heutige industrielle Landwirtschaft wäre ohne die Verwendung von Phosphatdünger nicht möglich, weswegen zur Sicherung hoher landwirtschaftlicher Erträge bei einem gleichzeitigen Anstieg der Weltbevölkerung, der Abbau von Phosphatgestein und die Herstellung von Düngemittel stetig zunehmen. (Maurer, 2014), (Roskosch, et al., 2014)

Phosphor ist eine begrenzte Ressource mit einem Massenanteil von etwa 0,1 % in der Erdkruste. Die vorhandenen Phosphorreserven reichen rein rechnerisch noch einige Dekaden zur Deckung des Bedarfs, jedoch nimmt die Verfügbarkeit der leicht abbaubaren Phosphaterze mit geringen Schwermetallgehalten kontinuierlich ab. Außerdem beschränken sich die natürlichen Phosphorvorkommen auf wenige Länder, wobei einige Exportländer wie China, Russland oder USA die Ausfuhr zunehmend reglementieren und einschränken. Andere Phosphor-Lagerstätten befinden sich in politischen Krisengebieten, wodurch kurzfristige Lieferengpässe nicht auszuschließen sind. Da sich die Phosphor-Vorkommen in Europa lediglich auf ein kleines Gebiet in Finnland beschränken, ist Europa vollständig von den Importen aus anderen Staaten abhängig. (Grünes, et al., 2014)

Die Förderung und die Verarbeitung des Rohphosphats sind energieaufwändig und zum Teil mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden. In den abgebauten Phosphaterzen ist ein zunehmender Schadstoffgehalt feststellbar, weswegen nicht nur die Umweltbelastungen zunehmen, sondern auch der Aufwand für die Aufbereitung. Dies hat Auswirkungen auf den Weltmarktpreis von Rohphosphat, der in den letzten Jahren starke Schwankungen aufwies. Nicht nur der höhere Aufwand der Förderung, sondern auch die stetig zunehmende Nachfrage nach P-Düngemitteln, führen unweigerlich zu Preissteigerungen. (Grünes, et al., 2014)

Neben dem Abbau und der Aufbereitung von Phosphaterz hat auch der Einsatz von mineralischen Düngemitteln Auswirkungen auf die Umwelt. Bei übermäßigem Düngemiteleinsatz in der Land-

wirtschaft gelangt Phosphor in die Umwelt, speziell ins Grundwasser und in Oberflächengewässer. In Flüssen, Seen und Meeren führt eine erhöhte Phosphorfracht zur Eutrophierung und beeinflusst somit das aquatische Ökosystem. Außerdem erfolgt durch die Verwendung von mineralischen Düngemitteln eine Ausbringung der darin enthaltenen Schadstoffe auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Da der Hauptbedarf an Phosphor in der Landwirtschaft liegt, wird dieser Themenbereich im nächsten Kapitel detaillierter beschrieben. (Wolff, 2008), (Dittrich, et al., 2008)

Letztendlich ist die Entwicklung einer nachhaltigen Phosphor-Strategie, aus den oben genannten Gründen, zwingend notwendig. Insbesondere der geplante Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm veranlasst die politischen Entscheidungsträger gezielte Maßnahmen zur Förderung der Phosphor-Rückgewinnung zu entwickeln, um Phosphor zurück in den Nährstoffkreislauf zu führen.

In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk in der Wertschöpfung bzw. Rückgewinnung von Phosphor aus den Stoffströmen Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammaschen, Bioabfall und tierische Nebenprodukte. Für Hessen werden die vorhandenen Phosphor-Potentiale aufgezeigt sowie den derzeitigen Stand der Wertschöpfung. Außerdem erfolgt für die Bereiche Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche eine ausführliche Beschreibung und Bewertung bereits erprobter Verfahren.

Um einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Phosphor und die Einhaltung der politischen Vorgaben zu gewährleisten, sind kurzfristige Entscheidungen über die Entwicklung und Implementierung verschiedener Phosphor-Rückgewinnungsverfahren notwendig. Dies ist nicht nur ein wichtiger Schritt in Richtung Nachhaltigkeit und Ressourcenschutz, sondern eine Maßnahme zur Sicherung der Nahrungsmittelproduktion und zur Festigung der Unabhängigkeit.

3. Das Element Phosphor

Der Begriff Phosphor kann aus dem griechischen Wort „phosphoros“ abgeleitet werden und bedeutet so viel wie „Lichtträger“. Das Element Phosphor (P) steht im Periodensystem in der 5. Hauptgruppe und zählt zu den Nichtmetallen. Für alle lebenden Organismen stellt Phosphor ein essentielles Spurenelement dar, ohne das lebenswichtige Prozesse wie Stoffwechsel und Wachstum nicht funktionieren. Phosphor ist Bestandteil jedes biologischen Organismus und ist für den Aufbau von DNA und RNA sowie den Zellaufbau von großer Bedeutung. Zu den bedeutendsten Phosphorverbindungen zählen ADP/ATP, die am Energieumsatz im pflanzlichen und tierischen Organismus beteiligt sind, sowie Calciumphosphate, die den Hauptbestandteil der Knochen und Zähne der Wirbeltiere und des Menschen bilden. (Roskosch, et al., 2014), (Grünes, et al., 2014)

3.1. Weltweite Vorkommen

Phosphor kommt in der Natur nicht elementar vor, sondern ist in Form von Phosphat in Mineralien und Gesteinen gebunden. Für die Herstellung von Phosphor und Phosphorverbindungen sind die bedeutendste Mineralgruppe die Apatite. 95 % des Phosphors ist in Apatiten gebunden. Ökonomisch gesehen sind die wichtigsten Fluorapatit und der mit Calciumcarbonat durchsetzte Phosphorit. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Hauptsächlich sind die natürlichen Phosphorvorkommen magmatogenen oder sedimentären Ursprungs, wobei die Förderung von Phosphaterz aus sedimentären Lagerstätten den Großteil ausmacht. Magmatogene P-Erze beinhalten i.d.R. einen P_2O_5 Gehalt von 4 bis 17 %, während sedimentäre P-Erze in den USA 10 bis 15 % und in südlichen und östlichen Anrainerstaaten des Mittelmeers Gehalte von über 25 % P_2O_5 aufweisen können. Die höchsten Gehalte von maximal 38 % sind hingegen auf der russischen Halbinsel Kola zu verzeichnen. (Grünes, et al., 2014)

Weltweit steigt die Nachfrage nach Phosphor, während die Reserven abnehmen. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf den Preis, sondern auch auf die Qualität des Rohstoffs. Heutzutage erfolgt die Förderung von Phosphaterz aus immer tiefer liegenden und schwerer abzubauenen Bereichen, wo die Belastung mit toxischen Metallen wie Cadmium und radioaktivem Uran kontinuierlich zunehmen. Der entstehende Mehraufwand der Aufbereitung der Rohphosphate zu P-Düngemittel beeinflusst wiederum die Preisentwicklung. (N.V. Slibverwerking Noord-Brabant)

Bezüglich der heute bekannten Reserven besitzt Marokko/westliche Sahara mit Abstand die größten Vorkommen an Phosphat, danach folgen China, Algerien, Syrien und Südafrika (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 – Weltweite Phosphorreserven (U.S. Geological Survey, 2014)

Land	Phosphatreserven [Mt]
Marokko/ West Sahara	50.000
China	3.700
Algerien	2.200
Syrien	1.800
Südafrika	1.500
Jordanien	1.300
Russland	1.300
U.S.A.	1.100
Andere	4.100
Insgesamt	67.000

3.2. Förderung und Preisentwicklung von Rohphosphat

Bezüglich der Förderung belegt die Volksrepublik China den ersten Platz mit einer Fördermenge von 97 Mt im Jahr 2013, gefolgt von den U.S.A. und Marokko (siehe Tabelle 2). Zudem ist im weltweiten Vergleich der Verbrauch an Phosphor in Asien am höchsten. Neben China besitzt Indien eine sehr hohe Nachfrage, da es selbst über keine eigenen Phosphorreserven verfügt. (Maurer, 2014).

Tabelle 2 - Minenproduktion der jeweiligen Staaten (U.S. Geological Survey, 2014)

Land	Förderungsmenge [Mt]
China	97,0
U.S.A.	32,3
Marokko	28,0
Russland	12,5
Jordanien	7,0
Brasilien	6,7
Andere	40,5
Insgesamt	224,0

Nach der Förderung des Phosphaterzes erfolgt die Aufbereitung. Hierzu wird das Phosphaterz zerkleinert, gewaschen, gesiebt und anschließend getrocknet. Nach diesem Verfahrensschritt spricht man von Rohphosphat (Pinnekamp, et al., 2011). Zusätzlich kann eine Flotierung durchgeführt werden, um unlösliche Bestandteile wie z.B. Ca/Mg-Carbonate abzutrennen. Als nächster Verfahrensschritt erfolgt ein Aufschluss. Generell gibt es zwei Verfahren – den thermischen Aufschluss und den nasschemischen Aufschluss mit Säure. Beim thermischen Aufschluss kann elementarer Phosphor gewonnen werden. Dieses Verfahren ist jedoch mit einem hohen Energieaufwand verknüpft, weswegen der Nassaufschluss häufiger zum Einsatz kommt. Je nach Verfahrensansatz wird für den nasschemischen Aufschluss Schwefelsäure, Salzsäure oder

Salpetersäure verwendet. Als Produkt erhält man u.a. Phosphorsäure, die z.B. Anwendung in der Düngemittel- oder Lebensmittelindustrie findet. (Reuvers, 2014)

Laut den Daten des U.S. Geological Survey betragen die Gesamtreserven von Phosphor rund 67 Billionen Tonnen. Die weltweite Fördermenge im Jahr 2013 betrug rund 224 Mio. Tonnen. Theoretisch reichen die Reserven noch etwa 300 Jahre, allerdings hängt dies im Wesentlichen von zwei Faktoren ab (U.S. Geological Survey, 2014):

- die Entwicklung des Verbrauchs an Phosphor
- das Ausmaß der noch nicht entdeckten Reserven

Generell sind Schätzungen zu möglichen Phosphorreserven sehr schwierig, da keine Sicherheit besteht, ob die Staaten die realen Daten veröffentlichen.

Wenn die Nachfrage beispielsweise jährlich um 2 % steigt, reichen die Reserven, die direkt verarbeitet werden können, noch 60 Jahre. Die schwierig abzubauenen Ressourcen noch 100 Jahre. Der Aufwand der Extraktion des Phosphors steigt zunehmend, wodurch die Fördermenge die Nachfrage nicht mehr deckt und die Preise sehr stark steigen. Einige Forscher sind der Meinung, dass dieses Szenario bereits in den Jahren 2030 bis 2040 eintreffen könnte. Andere wiederum meinen, dies könnte noch früher geschehen (White, et al., 2008). Unstrittig ist jedoch, dass die P-Reserven unter der Berücksichtigung des weltweiten Verbrauchs, auf wenige Dekaden begrenzt sind.

Nicht nur die Abnahme der P-Reserven, sondern auch die Entwicklung des Marktpreises von Rohphosphat sollte berücksichtigt werden. Bis 2006 lag dieser konstant bei etwa 30 Euro pro Tonne. Erst Mitte 2007 begann der Preis sprunghaft zu steigen, bis er schließlich im Oktober 2008 den Höchstwert von 311 Euro erreichte. Bis August 2009 fiel der Preis rasant ab auf 62 Euro pro Tonne. Nach einer Phase des Anstiegs bis zum August 2012, sank der Preis bis zum Jahr 2014 wieder und betrug im Februar 75 Euro pro Tonne (Abbildung 1). (indexmundi, 2014)

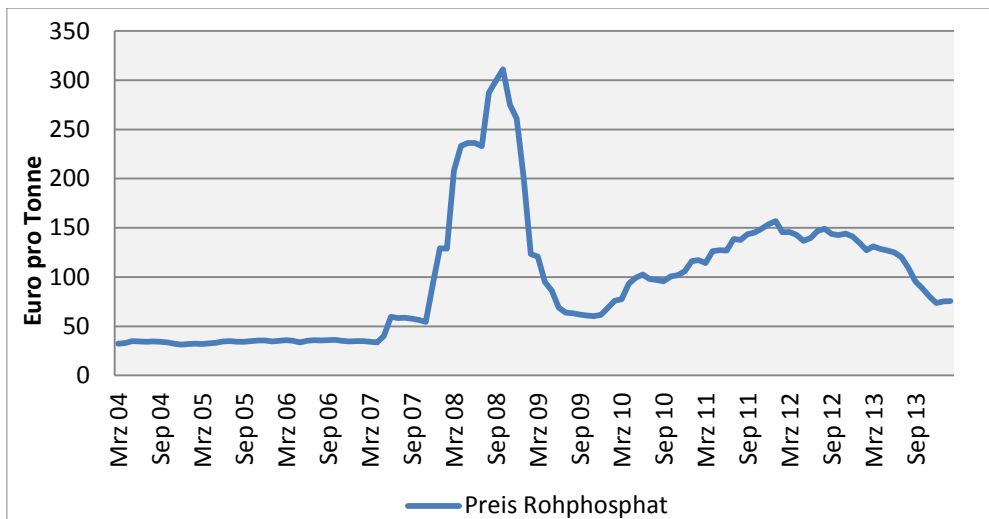


Abbildung 1 - Preisentwicklung Rohphosphat (indexmundi, 2014)

Der extreme Anstieg im Jahr 2008 ist wahrscheinlich auf den Ausbruch des „Arabischen Frühlings“ zurückzuführen. Dieser beeinflusste den Tagebaubetrieb und den Export des Rohstoffs in diesen Gebieten. Beispielsweise reduzierte sich der Export Tunesiens von einer Milliarde US\$ auf 0,6 Milliarden US\$. Die Exporte aus Syrien kamen komplett zum Stillstand, während zuvor ca. 40 % der Exporte von Phosphat in die EU erfolgten. Auch in Jordanien und Marokko kam es aufgrund von Streiks der Minen- und Straßenarbeiter zu Versorgungsengpässen. Mittlerweile hat sich die Lage wieder beruhigt, jedoch befinden sich diese Staaten noch immer in einer politisch instabilen Situation (The European Sustainable Phosphorus Platform, 2013). In Zukunft wird sich zeigen, ob dieser „Peak“ ein Einzelfall war, oder ob sich solche Preisentwicklungen wiederholen.

Die Abnahme der Reserven und der Qualität des Rohphosphats hat nicht nur direkte Auswirkungen auf den Rohstoffpreis, sondern auch auf den Preis der Lebensmittel. Abbildung 2 zeigt die Korrelation des Preises für Rohphosphat und Weizen. Abgesehen von einigen Schwankungen, ist ein Zusammenhang der Preisentwicklungen beider Erzeugnisse deutlich erkennbar. Zudem zeichnet sich bei dem starken Anstieg im Jahr 2007/2008 eine Preiszunahme bei Weizen noch vor der Zunahme bei Rohphosphat ab. Vermutlich ist dies auf Spekulationen an den Handelsbörsen zurückzuführen.

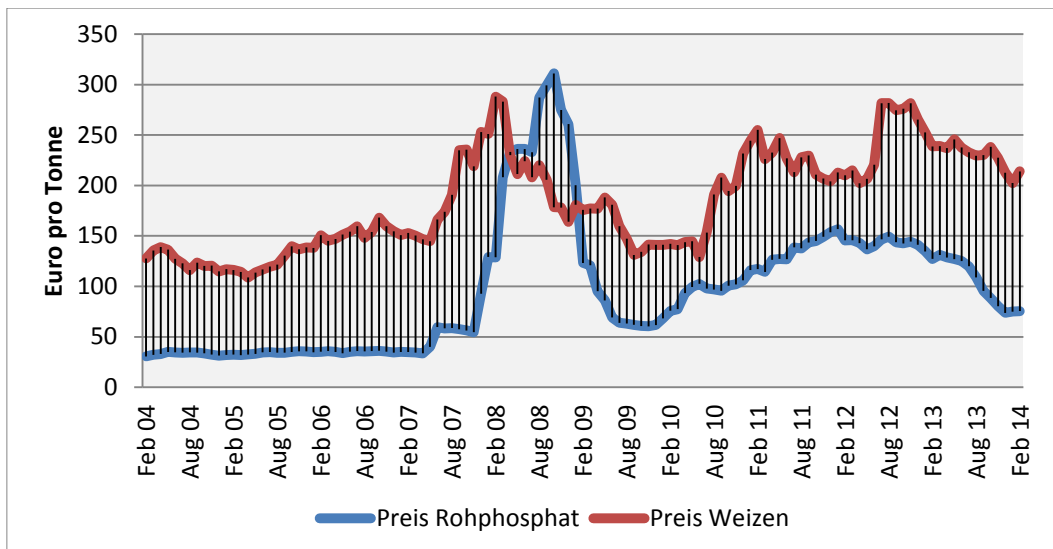


Abbildung 2 - Preisentwicklung Rohphosphat parallel zu Weizen (indexmundi, 2014)

Für die spätere Beschreibung und Bewertung der P-Rückgewinnungsverfahren ist die Angabe des aktuellen Marktpreises für Phosphor von Bedeutung. Allerdings existiert kein einheitlicher, weltweit gültiger Marktpreis (Pinnekamp, et al., 2011). In verschiedenen Forschungsarbeiten werden unterschiedliche Marktpreise angegeben. Da in der Bewertung und Gegenüberstellung der Verfahren oftmals Daten aus dem „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ (Egle, et al., 2014) Verwendung finden, wird der darin ermittelte Marktpreis von ca. 2,5 €/kg P angenommen.

3.3. Verwendung von Phosphor

Global betrachtet liegt der Hauptbedarf mit ca. 85 % in der Düngemittelindustrie. Der restliche Anteil der hergestellten Phosphate wird in dem Bereich der Tierernährung, Lebensmittelindustrie sowie der technischen Industrie verwendet. (Maurer, 2014)

Anwendungsmöglichkeiten von Phosphorverbindungen sind z.B. in Futtermitteln (Dicalciumphosphat), als Flammschutzmittel oder als Korrosionsschutzmittel (Phosphatierung). Außerdem haben organische Phosphorsäure-Verbindungen in Kunststoff- und Lackergezeugnissen die Funktion eines Weichmachers. In Wasch- und Reinigungsmitteln wird z.B. Pentanatriumtriphosphat für die Wasserenthärtung benutzt. Auch in Form von Lebensmittelzusatzstoffen finden Phosphate zahlreiche Anwendungen, wie z.B. Kaliumphosphat (E 340), Calciumphosphat (E 341), Triphosphat (E451) oder Natriumphosphat (E339). Diese werden als Säuerungsmittel, Emulgatoren, Konservierungsmittel, Festigungsmittel oder Antioxidationsmittel eingesetzt. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

3. Das Element Phosphor

Allein im Jahr 2010 wurden in Deutschland 118.000 t an ungemahlene Phosphaten importiert. Der Hauptanteil mit 83 % stammte aus Israel, die restlichen 17 % aus Syrien, Algerien und Ägypten (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012). Tabelle 3 veranschaulicht welche Mengen an Phosphor in welchen Branchen eingesetzt wurden.

Tabelle 3 - Einsatz von Phosphor in Deutschland pro Jahr, untergliedert in Branchen (Schätzungen des Umweltbundesamts) (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Branche/ Verwendungszweck	P verwendet als	Einsatz pro Jahr [t]	Umgerechnet auf P [t]
Düngemittel	P_2O_5	235.160	102.530
Futtermittel	PO_4	115.000	37.490
Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittel im Bereich Privathaushalte	$Na_5P_3O_{10}$	31.800	8.050
	Phosphonate	3.900	880
	H_3PO_4	700	220
Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittel im industriellen u. institutionellen Bereich	$Na_5P_3O_{10}$	3.180	810
	Phosphonate	780	180
	H_3PO_4	180	60
Lebensmittelindustrie	P_2O_5	23.000	10.030
Flammschutzmittel			4.000
Trinkwasserversorgung			4.300
Korrosionsschutz			k.A.
Pharmazeutische Erzeugnisse			k.A.
Pflanzenschutzmittel, Insektizide, u.ä.			k.A.
Gesamt			168.500

Abbildung 3 veranschaulicht die prozentuale Verteilung der Einsatzmengen in Deutschland. Der gesamte Einsatz von Phosphor beträgt pro Jahr etwa 170.000 t. Allerdings ist zu vermerken, dass zu den Anwendungsgebieten Korrosionsschutz, pharmazeutische Erzeugnisse und Produkte wie Pflanzenschutzmittel und Insektizide keine Daten vorhanden sind. Zudem sind die Angaben mit einer Unsicherheit behaftet, da die Verwendung von Phosphor in vielen unterschiedlichen Formen und Verbindungen stattfindet, bei denen nicht immer Angaben zu finden sind. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

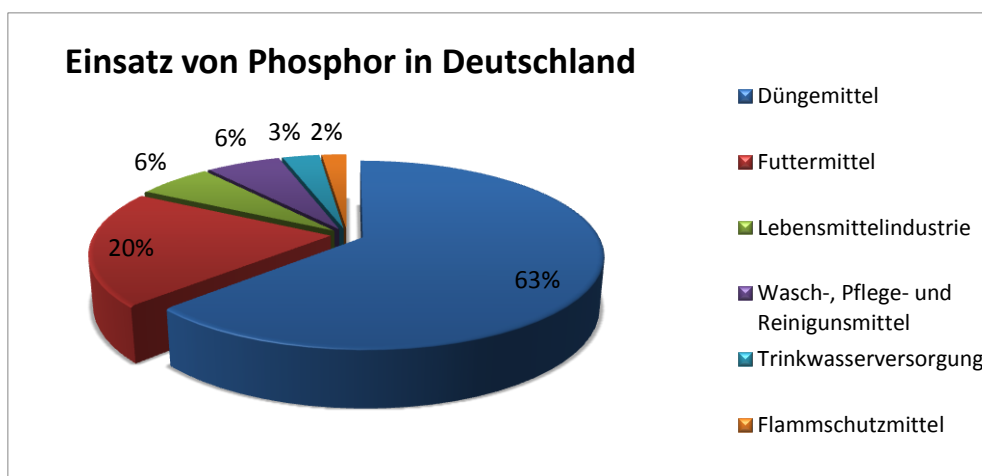


Abbildung 3 - Abschätzung des prozentualen Phosphoreinsatzes in Deutschland (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

3.4. Notwendigkeit des Ressourcenschutzes und der Phosphor-Rückgewinnung

Neben der stetigen Abnahme der Phosphorreserven, werden in den nächsten Abschnitten weitere Gründe genannt, die einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Phosphor und die Weiterentwicklung von P-Rückgewinnungsverfahren erfordern.

3.4.1. Ökologische Auswirkungen

Der Abbau der phosphorhaltigen Mineralien greift in die Umwelt ein. Mithilfe von Sprengungen werden die Gesteinsschichten abgetragen, wobei der Tagebau tiefe Krater in der Landschaft hinterlässt. Der Abbau ist mit erheblichem Abraum und Wasserverbrauch verbunden. Außerdem ist eine anschließende Aufbereitung des Rohphosphats unter dem Einsatz starker Säuren erforderlich. Infolge des Säureaufschlusses mit Schwefelsäure entsteht als Nebenprodukt Gips, der mitunter radioaktiv belastet ist. Entsorgt wird der Gips bspw. in Deponien, allerdings ist die Überwachung und Instandhaltung sehr aufwändig. Desweiteren besteht auch die Gefahr, dass Staaten sich nicht an die Umweltauflagen halten und die Abfallprodukte nicht ordnungsgemäß lagern oder beseitigen. (Reuvers, 2014)

Nicht nur während des Abbaus und der Aufbereitung entstehen Schäden in der Umwelt, sondern auch die Verwendung von phosphorhaltigen Produkten ist mit Auswirkungen verbunden. Durch Rückstände von Wasch- und Reinigungsmitteln im Abwasser und durch Abschwemmungen von Düngemitteln auf landwirtschaftlichen Flächen gelangen zunehmend Phosphorverbindungen in die Umgebung und können zur Eutrophierung von Gewässern beitragen. Unter Eutrophierung versteht man eine Überdüngung von Gewässern, infolge einer Überlastung mit Nährstoffen wie Phosphor- und Stickstoffverbindungen. Daraus resultiert die Beschleunigung des Wachstums von Algen und Wasserpflanzen, gleichzeitig erhöht sich die Sterberate von Pflanzen, die unter Sauerstoffverbrauch von Mikroorganismen zersetzt werden müssen. Der Sauerstoffgehalt im Gewässer sinkt fortlaufend bis zu einem bestimmten Punkt, an dem der Abbau organischer Verunreinigungen durch aerobe Bakterien stoppt und der anaerobe Zersetzungsprozess beginnt. Dabei werden toxische Verbindungen wie Ammoniak, Methan oder Schwefelwasserstoff gebildet, die in höheren Konzentrationen zu Fischsterben und zum völligen „umkippen“ des Gewässers führen. (Wasser Wissen - Das Internetprotal für Wasser und Abwasser)

Ein Beispiel der negativen Auswirkung der Eutrophierung lässt sich in der Ostsee beobachten. Durch die hohen Frachtmengen an Phosphor- und Stickstoffverbindungen aus der Tierzucht und der Landwirtschaft haben sich sogenannte „Todeszonen“ entwickelt, in denen aufgrund des Sauerstoff-

mangels viele Arten nicht überleben können. Aktuellen Berichten zufolge haben diese Zonen bereits beinahe ein Drittel der Gesamtfläche der Ostsee eingenommen. (Wolff, 2008)

3.4.2. Gesundheitliche Auswirkungen

Die Verwendung von mineralischen Düngern schließt auch die Ausbringung von Schwermetallen, wie z.B. Blei, Cadmium oder radioaktives Uran, mit ein. Tabelle 4 stellt Gehalte von verschiedenen Schwermetallen bezüglich der Herkunft des Rohstoffs dar. Rohphosphate sedimentären Ursprungs weisen stärkere Kontaminationen mit Schwermetallen auf als Phosphate magmatischer Entstehung. Zudem sind starke Unterschiede der Schwermetallgehalte in den verschiedenen Lagerstätten zu verzeichnen. Rohphosphat aus China weist im Vergleich zu Lagerstätten in den USA einen deutlich geringeren Gehalt an Cadmium auf. Der Höchstwert lag in China bei 2,5 mg/kg, während dieser in den USA bei 92 mg/kg lag. Dasselbe gilt für Uran, wobei Lagerstätten in Marokko und im Mittleren Osten auch hohe Uran-Konzentrationen enthalten. (Grünes, et al., 2014)

Tabelle 4 - Schwermetallgehalte von Rohphosphaten im Hinblick auf die Herkunft (Dittrich, et al., 2008)

mg/kg TM	Rohphosphate					Hintergrundwerte für Böden	
	USA	Marokko	China	Mittlerer Osten	Russland (Kola)	Sand	Löss
As	7 – 24	9,2 – 13	9 – 26	2,1 – 35	1 – 10	2	8
Cd	6,1 – 92	15 – 38	<2 – 2,5	1,5 – 35	0,1 – 1,3	<0,3	<0,3
Cr	60 – 637	75 – 279	18 – 33	25 – 230	bis 13	17	120
Cu	9,6 – 23	1 – 22	n.v.	5 – 31	15 – 30	7	18
Hg	0,05 – 0,29	0,04 – 0,86	0,005 – 0,21	0,002 – 0,02	0,004 – 0,01	0,05	0,12
Ni	17 – 37	bis 26	n.v.	20 – 80	2 – 15	4	28
Pb	4,6 – 17	7 – 14	1,5 – 6	1 – 33	1,8 – 33	20	43
Zn	204 – 382	bis 261	n.v.	29 – 630	19 – 23	25	69
U	65 – 180	75 – 155	23 – 31	40 – 170	10 – 28	weltweit 0,8 – 11	

n.v. = Daten nicht vorhanden

Schwermetalle können nicht nur in den Rohphosphaten, sondern auch in den Düngemitteln nachgewiesen werden. In Tabelle 5 ist der Gehalt verschiedener Schwermetalle in teilaufgeschlossenem Rohphosphat und Triple Superphosphat dargestellt.

Tabelle 5 - Schwermetallgehalte in Phosphatdüngern (Dittrich, et al., 2008)

P-Dünger		P ₂ O ₅	As	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg	Tl	Cu	Zn	U
		%	mg/kg TM					bzw. mg Cd/kg P ₂ O ₅ TM				
Teilaufgeschlossenes Rohphosphat n = 21	MW	39,8	9,81	4,01	64,0	152	36,9	0,03	0,51	31,7	448	177
	Min	39,3	6,2	0,01	26,6	116	23,1	0,01	0,12	15,7	82,1	131
	Max	41,0	22,2	50,3	79,2	204	50,2	0,05	0,83	48,2	680	200
Triple Superphosphat n = 11	MW	45,5	6,24	14,7	62,1	229	20,9	0,02	0,35	15,3	354	104
	Min	45,3	3,06	0,01	36,7	124	5,88	0,01	0,15	2,4	204	42,7
	Max	46,3	12,4	57,9	73,1	478	48,4	0,03	0,45	34,2	527	173

3. Das Element Phosphor

Nach dem Untersuchungsbericht „Bestimmung und Bewertung von Schwermetallen in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Kultursubstraten“ der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, lagen bei zwei Drittel der analysierten Phosphatdünger Überschreitungen des Grenzwerts bezüglich Cadmium (50 mg Cd/kg TM) vor (Dittrich, et al., 2008). Auch der Thallium-Grenzwert wurde mehrfach überschritten. Zur Begrenzung der Schwermetalleinträge in Böden existieren Grenzwertfestlegungen in mehreren Verordnungen. Folgende Tabelle gibt Auskunft über die aktuellen Grenzgehalte für Schwermetalle in Düngemitteln nach Bioabfallverordnung (BioAbfV), Düngemittelverordnung (DüMV) und aktuellem Arbeitsentwurf (20.08.2010) der Klärschlammverordnung (AbfKlärV):

Tabelle 6 - Grenzwerte für den Düngemiteleinsatz (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2008) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1992) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1998)

Element	DüMV (2008)		AbfKlärV	BioAbfV
	Kennzeichnung ab mg/kg TM	Grenzwert mg/kg TM	Grenzwert mg/kg TM	Grenzwert mg/kg TM
Arsen	20	40	-	-
Blei	100	150	900	150 ²⁾ / 100 ³⁾
Cadmium	1,0 / 20 ¹⁾	1,5 / 50 ¹⁾	10	1,5 / 1
Chrom (ges.)	300	-	900	100 / 70
Chrom (Cr^{VI})	1,2	2	-	-
Nickel	40	80	200	50 / 35
Quecksilber	0,5	1,0	8	1 / 0,7
Thallium	0,5	1,0	-	-
Kupfer	-	-	800	100 / 70
Zink	-	-	2500	400 / 300

¹⁾ Für Düngemittel ab 5 % P₂O₅ (FM)

²⁾ Gilt für Aufbringung von bis zu 20 t Bioabfälle je Hektar innerhalb von 3 Jahren

³⁾ Gilt für Aufbringung von bis zu 30 t Bioabfälle je Hektar innerhalb von 3 Jahren

Der Vergleich der Grenzwerte der Düngemittelverordnung mit den Schwermetallgehalten der Phosphatdünger zeigt, dass die Grenzwerte, mit Ausnahme von Cadmium, weitgehend eingehalten werden. Allerdings befindet sich in allen Phosphatdüngern ein gewisser Gehalt an Uran. Bis heute wurde für Uran lediglich ein Richtwert, und kein gesetzlicher Grenzwert, festgelegt. Aufgrund der unvorhersehbaren Auswirkungen, wird die Uranbelastung in Düngemitteln im Folgenden genauer untersucht.

Im Jahr 2012 führte das Umweltinstitut München eine gammaspektroskopische Analyse von granulierten Düngemitteln durch. Das Resultat war eine Überschreitung des vom Umweltbundesamt empfohlenen Richtwerts von 50 Milligramm Uran je Kilogramm Phosphat bei fast allen Produkten. Sechs der sieben getesteten Düngemittel enthielten einen höheren Urangehalt als der empfohlene Richtwert. Das Produkt „Blaukorn NovaTec“ der Firma Compo wies, mit einer Überschreitung von 760 % des Richtwerts, den höchsten Urangehalt auf. Zum Vergleich wurde außerdem Kompost aus privater Herstellung analysiert. Hier wurden nur Spuren gemessen, die auf das natürliche Vorkommen von Uran auf der Erde zurückzuführen sind. Zudem erfolgte eine Bestimmung der

3. Das Element Phosphor

Zerfallsaktivität (in Becquerel) des Urans in den Produkten. Diese beschreibt die Anzahl der Atomkerne, die in einer Sekunde zerfallen. (Umweltinstitut München e.V., 2012)

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 7 aufgeführt:

Tabelle 7 - Urangehalt in unterschiedlichen Düngemitteln ($U_{ges} = U_{238}$ und U_{235}) (Umweltinstitut München e.V., 2012)

Hersteller	Bezeichnung	mg U_{ges} /kg Phosphat	Bq U_{ges} /kg Dünger
Compo	Blaukorn NovaTec	379,3	339,1
Dehner	Blaukorn chloridarm	333,8	258,7
Compo	Koniferen Langzeit-Dünger	312,7	242,4
Compo	Buchsbaum Langzeit-Dünger	294,7	229,7
Floraplus Premium	Rosendünger	226,4	290,8
Gardol	Blaudünger Universal	70,4	112,7
Compo	Agrosil	7,3	18,7
-	Organischer Dünger	0,4	1,9
Richtwert: 50 mg Uran/kg Phosphat			

Infolge des Einsatzes von Mineraldüngern in der Landwirtschaft, im Gartenbau, auf Grünflächen oder in Schrebergärten können durch Abschwemmungen oder Auswaschung schädliche Stoffe, wie Uran, ins Grundwasser oder in Oberflächengewässer gelangen. Bereits heute treten regelmäßig Überschreitungen des 2011 eingeführten Grenzwerts von 10 µg Uran pro Liter Trinkwasser auf (Umweltinstitut München e.V., 2012). Zudem besteht die Möglichkeit, dass Uran durch Einlagerung in Pflanzen in die Nahrungskette gelangt. Es ist ein toxisches Element, das schwere Nierenschäden, Lungeninfektionen oder Herzschwäche auslösen kann und zudem das Erbgut schädigt. Es reichert sich in Gewebe und Knochen an und durch die ionisierende Strahlung steigt die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Krebszellen. Dazu entstehen radioaktive Zerfallsprodukte des Urans, die wiederum das Krebswachstum begünstigen können (Umweltinstitut München e.V., 2012).

Seit 60 Jahren ist eine stetige Zunahme der Verwendung von mineralischen Düngern zu verzeichnen. Schätzungsweise gelangen pro Jahr 100 Tonnen Uran auf deutsche Böden. Das Bundesforschungsamt für Landwirtschaft schätzt, dass mit dem Einsatz der Mineraldünger jährlich ein Eintrag von 10 bis 22 g Uran pro Hektar stattfindet. (Umweltinstitut München e.V., 2012)

Das ausgebrachte Uran liegt in einer sehr mobilen und leicht löslichen Form vor und dringt mit dem Regenwasser in den Boden ein. In der Bodenmatrix werden ca. 90 % des Urans gebunden, z.B. an Tonminerale oder organische Substanzen. Die restlichen 10 % des gelösten Urans gelangen in tiefere Bodenhorizonte, bis hin zum Grundwasser. Schätzungen zufolge werden ca. eine Million Menschen in Deutschland mit Trinkwasser versorgt, das den Grenzwert von 10 µg Uran pro Liter überschreitet. Zudem findet durch die intensive Phosphatdüngung über Dekaden hinweg eine Akkumulation an Uran in den landwirtschaftlich genutzten Flächen statt. (Umweltinstitut München e.V., 2012)

3.4.3. Geopolitische Aspekte

Neben den gesundheitlichen Auswirkungen beeinflussen auch geopolitische Unsicherheiten die Notwendigkeit einer Phosphor-Rückgewinnung. Europa ist von Importen abhängig. Einige P-Lagerstätten befinden sich in politischen Krisengebieten, wodurch die Ausfuhr von Phosphaten durch Unruhen beeinflusst werden kann. Drohende Konflikte oder Verteilungskämpfe zwischen Staaten sind nicht auszuschließen. Als Folge ist mittel- bzw. langfristig mit Versorgungsengpässen zu rechnen. (The European Sustainable Phosphorus Platform, 2013)

Die Weltbevölkerung und der Wohlstand in Afrika, Südamerika und Asien wachsen kontinuierlich und wirken sich somit auf den Konsum aus. Besonders die Fleischproduktion fällt stark ins Gewicht. Um 1 kg Fleisch zu produzieren, werden bis zu 16 kg Getreide benötigt (PETA Deutschland e.V.). Damit das Getreide optimal wächst, werden mineralische Düngemittel eingesetzt. Auch die steigende Nachfrage nach Biotreibstoffen, wie beispielsweise Biodiesel oder Biogas, führt infolge des gesteigerten Düngemittelverbrauchs zu höheren Abbauraten und schließlich zur Verknappung der Reserven. (The European Sustainable Phosphorus Platform, 2013)

3.4.4. Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm

Im Jahr 2012 wurden in Hessen 151.693 t Klärschlamm (Trockensubstanz), einschließlich der Zuschlagsstoffe zur Konditionierung und Stabilisierung, erzeugt und entsorgt. Rund 55.000 t (36 %) davon werden als Dünger in der Landwirtschaft in den ländlichen Regionen Hessens eingesetzt (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013). Der Klärschlamm stammt aus kommunalen Kläranlagen, in denen die Abwässer insbesondere aus privaten Haushalten und vergleichbaren Einrichtungen gereinigt wird. Die Nutzung von Klärschlamm als Düngemittel wird zum Teil sehr kontrovers diskutiert. Klärschlamm ist reich an organischer Substanz, aus der wertvoller Humus entsteht. Außerdem enthält er wichtige anorganische Nährstoffe (Calcium, Stickstoff, Phosphor, Magnesium) und Spurenelemente (z.B. Kobalt, Kupfer, Molybdän), wodurch er als Ersatzdünger optimal geeignet ist und die Nutzung der enthaltenen Nährstoffe auch im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgedanken ist. Zudem ist die landwirtschaftliche Verwertung eine sehr kostengünstige Entsorgungsoption für die Kommunen, wenn der Klärschlamm auf nahe gelegenen Flächen ausgebracht wird, da hierfür nur eine geringfügige Entwässerung von Nöten ist. (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., 2005)

Den positiven Eigenschaften des Klärschlammes stehen jedoch auch zahlreiche negative Auswirkungen gegenüber. Klärschlamm ist eine Schadstoffschenke, d.h. Schadstoffe, die während des Reinigungsprozesses in den Kläranlagen nicht abgebaut werden können, reichern sich im Schlamm an. Darunter fallen anorganische Schadstoffe, wie z.B. Schwermetalle, deren toxische Wirkung auf

lebende Organismen bekannt ist. Daneben enthält Klärschlamm organische Schad- und Fremdstoffe, deren Auswirkungen zum Teil noch nicht erforscht sind. Hierunter fallen Dioxine, Furane, PAK, Xenobiotica, Arzneimittel (und deren Abbauprodukte) sowie hormonell wirksame Verbindungen für die es kaum Untersuchungen auf die Auswirkung auf das Ökosystem Boden und für den Menschen gibt und somit das Risiko nicht kalkulierbar ist. Darüber hinaus fehlen Kenntnisse über Kombinationseffekte beim gemeinsamen Auftreten bestimmter Schadstoffe, sowie auf die Verbreitungseigenschaften bestimmter Stoffe. (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., 2005)

Aufgrund der nicht vollständig abschätzbaren Auswirkungen, wird der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung in vielen Bundesländern diskutiert und auch geplant. Beispielsweise hat Baden-Württemberg den Ausstieg fast vollständig vollzogen. Der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung liegt in Baden-Württemberg bei 2 % und der Anteil der Verwendung im Landschaftsbau bei 6 %. In die thermische Entsorgung gehen 91 % der Klärschlämme. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2013)

Auch im Koalitionsvertrag der Bundesregierung wird ein Ende der Klärschlammausbringung zu Düngezwecken angekündigt. Jedoch sind bestimmte Voraussetzungen mit dem Ausstieg zu erfüllen. Die Rückgewinnung von Phosphor und anderen Nährstoffen aus dem Klärschlamm werden ausdrücklich gefordert, weshalb vor dem Ausstieg eine Phosphor-Recyclingstrategie entwickelt werden muss. Eine flächendeckende Umsetzung des technischen Phosphor-Recyclings wird noch einige Jahre in Anspruch nehmen. Somit wäre ein kurzfristiger Ausstieg mit erheblichen Nachteilen verbunden. Bereits heute werden bundesweit jährlich 50.000 t P_2O_5 infolge der Klärschlammverbrennung unwiederbringlich vernichtet. Desweiteren wird diskutiert, ob mit der Einführung neuer Anforderungen und Kontrollen eines Qualitätssicherungssystems, hochwertige Klärschlämme weiterhin in Landwirtschaft und Landschaftsbau stofflich verwertet werden können. (Verband zur Qualitätssicherung von Düngung und Substraten e.V., 2013)

In Hessen bestehen derzeit noch keine konkreten Pläne zum Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung. Der Koalitionsvertrag des Landes Hessen enthält eine Absichtserklärung der Bundesregierung. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung steht zum Thema Gewässer- und Meeresschutz: „Wir werden die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken beenden und Phosphor und andere Nährstoffe zurückgewinnen.“¹ Die Bundesregierung plant voraussichtlich eine Umsetzung dieser Absichtserklärung durch eine Novelle der Klärschlammverordnung und den Erlass einer Phosphor-Rückgewinnungsverordnung. Danach soll die Verwertung von kommunalen Klärschlämmen in Mitverbrennungsanlagen nur noch bei vorheriger Abtrennung des Phosphors erlaubt sein. Bei der

¹ Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode, S. 120

Verwertung in Monoverbrennungsanlagen sollen die Aschen entweder unmittelbar zu Düngemitteln aufbereitet oder auf separaten Deponieabschnitten gelagert werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt aufzubereiten (Roskosch, et al., 2014). Entwürfe zu den o.g. Verordnungen liegen bisher noch nicht vor. Der Vollzug der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung erfolgt weiterhin auf Grundlage des geltenden Rechts der Klärschlammverordnung und des Düngemittelrechts. (Göttlicher-Schmidle, 2014)

Zukünftig werden die Anforderungen an die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung strenger bemessen. Aus Tabelle 6 wird ersichtlich, dass die AbfklärV und die DüMV unterschiedliche Grenzwerte für Schwermetalle aufweisen. Die Schwermetalle Blei, Quecksilber, Cadmium, Nickel und Chrom sind in beiden Verordnungen geregelt, jedoch gibt es eine Übergangsfrist. Bis Ende 2014 gelten die höheren Grenzwerte der AbfklärV. Ab dem 01.01.2015 sind jedoch die strengeren Grenzwerte der DüMV einzuhalten (§10 Abs. 3): „Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel, zu deren Herstellung

1. Klärschlämme nach Anlage 2 Tabelle 7 Zeile 7.4.3, die einen Grenzwert nach Anlage 2 Tabelle 1.4 überschreiten, jedoch einen nach der Klärschlammverordnung für denselben Schadstoff geltenden Grenzwert einhalten, oder
2. andere Stoffe, die der Bioabfallverordnung unterliegen und die einen Grenzwert nach Anlage 2 Tabelle 1.4 überschreiten, jedoch einen nach der Bioabfallverordnung für denselben Schadstoff geltenden Grenzwert einhalten,

verwendet werden, dürfen noch bis zum 31. Dezember 2014 in den Verkehr gebracht werden.“²

Für die Parameter Arsen, Chrom IV und Thallium gibt es keine Regelungen in der AbfklärV, weswegen hier heute schon die Vorgaben der DüMV gelten. Für Kupfer und Zink sind keine allgemein gültigen Grenzwerte festgelegt. Jedoch gelten Höchstgehalte bei den Vorgaben für Spurennährstoffdünger. Klärschlamm ist nach Definition der DüMV ein Düngemittel mit Spurenstoffen, weswegen heute schon für Kupfer der Höchstgehalt der DüMV von 700 mg/kg TS greift. (Langenohl, et al., 2012)

Bei den organischen Schadstoffen sind nach der AbfklärV Grenzwerte für die Parameter der adsorbierbaren organisch gebundenen Halogene (AOX), der polychlorierten Biphenyle (PCB) und polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) festgesetzt. Die Novelle der AbfklärV wird voraussichtlich für zwei weitere Parameter Grenzwerte festlegen. Zum einen für Benzo(a)pyren und zum anderen für perfluorierte Tenside (PFT). Für PFT gilt heute schon ein Grenzwert, der in der DüMV definiert ist. Außerdem werden in der neuen DüMV Grenzwerte für Dioxine und dioxinähnliche PCB definiert werden, die ohne Übergangsfristen gelten, da diese in der AbfklärV nicht geregelt sind. (Langenohl, et al., 2012)

² Düngemittelverordnung, §10 Übergangsvorschriften, Abs. 3

Auch bei der Verwendung von synthetischen Polymeren zur Klärschlammwässerung werden in Zukunft strengere Vorgaben gelten: „Synthetische Polymere, die nicht den Maßgaben nach [...] als Aufbereitungshilfsmittel oder Anwendungshilfsmittel entsprechen, verwendet werden, dürfen bis zum 31. Dezember 2016 in den Verkehr gebracht werden.“³ Somit ist eine Ausbringung mit synthetischen Polymeren behandelter Klärschlamm ab 2017 nicht mehr zulässig.

3.5. Politische Entwicklungen auf EU-Ebene

Auf EU-Ebene ist in eine Novellierung der EU-Düngemittelverordnung in Bearbeitung. Zukünftig fallen nicht nur mineralische, sondern auch organische Düngemittel, inklusive Klärschlamm, unter die EU-weiten Richtlinien. Die zu Düngezwecken ausgebrachten Klärschlämme und Wirtschaftsdünger erhalten neue Hygiene- und Pflanzenverfügbarkeitskriterien und neue Regelungen bestimmter Schadstoffparameter oder -frachten. Der Entwurf wird voraussichtlich Ende des Jahres vorliegen, ein Inkrafttreten der neuen EU-Düngemittelverordnung wird nicht vor Anfang 2017 erwartet. (Roskosch, et al., 2014)

3.6. Potentielle phosphorhaltige Abfälle

In Zukunft wird die Phosphor-Rückgewinnung, aus den zuvor genannten Gründen, einen immer größer werdenden Stellenwert einnehmen. Folglich ist eine Bestimmung der Stoffströme mit hohem Phosphorgehalt bzw. Phosphorpotential von Bedeutung. Abbildung 4 gibt einen Überblick über das in organischen Siedlungsabfällen enthaltene Phosphat. Die Abschätzung beruht auf einer deutschlandweiten Erhebung. (Fricke, et al., 2003)

³ Düngemittelverordnung, §10 Übergangsvorschriften, Abs. 4

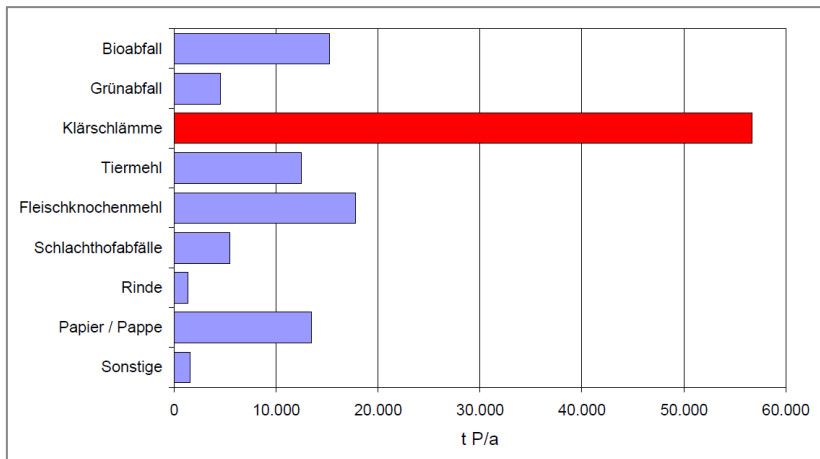


Abbildung 4 - Phosphorpotential der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland (Fricke, et al., 2003)

Klärschlämme besitzen mit ca. 57.000 t P/a das größte Phosphorpotential. Dahinter folgen Fleischknochenmehl, Bioabfälle sowie Papier und Pappe. Somit liegt der Schwerpunkt bei der Rückgewinnung von Phosphor auf der Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Verfahren im Bereich Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen. Da auch tierische Nebenprodukte und Bioabfälle ein bedeutendes Phosphorpotential aufweisen, wird in den folgenden zwei Kapiteln näher auf die Wertschöpfung bzw. mögliche Rückgewinnung von Phosphor aus diesen Stoffströmen eingegangen.

4. Möglichkeiten zur Nutzung des Phosphorgehalts tierischer Nebenprodukte

Die EG-Verordnung Nr. 1069/2009 enthält Hygienevorschriften zur sachgerechten Verarbeitung und Beseitigung tierischer Nebenprodukte. Im deutschen Recht wird dieser Sachverhalt über das Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG) geregelt (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2004). Basierend auf den Vorschriften findet eine Unterteilung der tierischen Nebenprodukte je nach dem potentiellen Risiko für Menschen und Tiere in drei Kategorien statt. Für jede Kategorie gelten somit spezielle Anforderungen an die Verarbeitung und Beseitigung. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Bei tierischen Nebenprodukten der Kategorie 1 handelt es sich um das so genannte spezifische Risikomaterial oder um Tiere, die von Tierseuchen (z.B. BSE) befallen waren. Diese Produkte müssen als Abfall verbrannt oder durch anderweitige zulässige Verfahren beseitigt werden, wenn keine Nutzung als Brennstoff oder Weiterverarbeitung zu Folgeprodukten möglich ist. Besonders bei Folgeprodukten sind eine sichere Behandlung sowie der sichere Endverwendungszweck einzuhalten. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Zur Kategorie 2 zählen so genannte „gefallene“ Tiere sowie Tierkörper bzw. -teile von nicht schlachtauglichen Tieren. Diese sind nicht zur Futtermittelherstellung geeignet, können jedoch nach einer entsprechenden Behandlung bspw. bei der Biogaserzeugung, der Kompostierung oder als Düngemittel zum Einsatz kommen. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Tierische Nebenprodukte der Kategorie 3 sind Produkte, die während der Schlachtung und Zerlegung gesunder Tiere anfallen und aus wirtschaftlichen oder ästhetischen Gründen für den menschlichen Verzehr nicht verwendet werden. Diese sind nach einer entsprechenden Behandlung zur Erzeugung von Futtermitteln geeignet. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Aus den Nebenprodukten der Kategorie 2 und 3 können nach einer entsprechenden Behandlung (Sterilisation und Hygienisierung) Fleischknochenmehl, Fleischmehl und Knochenmehl hergestellt werden. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009)

4. Möglichkeiten zur Nutzung des Phosphorgehalts tierischer Nebenprodukte

Die Verarbeitung der tierischen Nebenprodukte kann folgendermaßen beschrieben werden (STN - Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH):

- Zerkleinerung des Materials auf eine maximale Teilchengröße von 50 mm
- Sterilisation bei einer Temperatur von 133 °C und 3 bar über 20 Minuten
- Reduzierung des Wassergehalts von 60 – 80 % auf unter 5 % mithilfe eines Scheibentrockners oder eines Verdampfers
- Trennung des Produkts in Proteine und Tierfette mittels Fettpresse
- Zerkleinerung und Siebung der Proteine durch eine Mühle; anschließend Lagerung
- Reinigung der Tierfette in Dekanter, Abtransport in Fettverladetanks

Tierische Nebenprodukte der Kategorie 3 besitzen mit 6,1 % den größten Phosphorgehalt, jedoch finden diese vielfache Verwendung in der Industrie, weswegen eine explizite Rückgewinnung des Phosphors nicht sinnvoll ist. Tiermehle bzw. Tierproteine der Kategorie 3 finden Anwendung als Futter- oder Düngemittel. Tierfette dieser Kategorie können als Futtermittel, in der Oleochemie und der Biodieselherstellung eingesetzt werden. Somit steht der enthaltene Phosphor-Anteil in den Produkten weiteren Nutzungsmöglichkeiten zur Verfügung. (STN - Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH)

Tiermehle der Kategorie 2 besitzen einen Phosphorgehalt von 3,1 % und werden fast vollständig als Düngemittel eingesetzt. Nur ein minimaler Anteil wird thermisch verwertet. Tierfette der Kategorie 2 verwendet man in der Oleochemie und zur Biodieselherstellung. Folglich ist auch hier keine explizite P-Rückgewinnung von Nöten. (STN - Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH)

Als Letztes verbleiben die tierischen Nebenprodukte der Kategorie 1 mit einem Phosphorgehalt von 3,1 % (STN - Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH). Tierfette dieser Kategorie finden Anwendung in der Oleochemie, der Biodieselherstellung, der thermischen Verwertung und der Eigenverwertung (Verbrennung zur Energiegewinnung im eigenen Betrieb). Die Tierproteine der Kategorie 3 werden aufgrund ihrer mit Braunkohle vergleichbaren Energiegehalts vollständig der thermischen Verwertung in Zementwerken, Müllverbrennungsanlagen oder Heizkraftwerken zugeführt. Lediglich für diesen Stoffstrom könnte untersucht werden, ob Verfahren zur P-Rückgewinnung aus der Asche der tierischen Nebenprodukte möglich und sinnvoll ist, da der Phosphor infolge dieses Verarbeitungswegs unweigerlich verloren geht. (STN - Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH)

4.1. Situation in Hessen

In Hessen gibt es derzeit keine Tierkörperbeseitigungsanlage, die beseitigungspflichtige tierische Nebenprodukte der Kategorien 1 und 2 thermisch verwertet. Die beiden größeren Betriebe in Hessen zur Verwertung von Nebenprodukten sind die TAE Waage GmbH & Co. KG und die SÜPRO GmbH & Co. KG. Die TAE Waage GmbH & Co. KG stellt Tiermehle und Tierfette her. Die Fette werden weiterverarbeitet und das Tiermehl geht an den Zweckverband TKB Rheinland-Pfalz. Die SÜPRO GmbH & Co. KG hat sich auf die Herstellung von Düngemitteln spezialisiert und verarbeitet Material der Kategorie 2 aus dem Zweckverbandsgebiet Südhessen. Somit erfolgt bei beiden Betrieben eine Weiterverarbeitung der tierischen Nebenprodukte, wodurch keine explizite Phosphor-Rückgewinnung notwendig ist. (Fischer, 2014) (TAE GmbH & Co. KG, 2014)

Beseitigungspflichtiges Material der Kategorien 1 und 2 aus dem Zweckverbandsgebiet Südhessen wird in Lünen (Nordrhein-Westfalen) im Verarbeitungsbetrieb der SecAnim GmbH verarbeitet. Aus Nord- und Mittelhessen erfolgt die Verarbeitung dieses Materials durch den Zweckverband TKB Rheinland-Pfalz mit ihren Betrieben in Rivenich und Sandersmühle. (Lautenschläger, 2014)

An den Zweckverband TKB werden pro Jahr etwa 23.000 t an tierischen Nebenprodukten der Kategorien 1 und 2 geliefert. Dieses Material stammt aus den Landkreisen Kassel, Waldeck-Frankenberg, Werra-Meißner, Schwalm-Eder, Hersfeld-Rotenburg, Fulda, Marburg-Biedenkopf, Vogelsberg, Lahn-Dill, Gießen, Limburg-Weilburg und Rheingau-Taunus. Die Tierkörperbeseitigungsanlage stellt Tierfette und Tiermehle her. Das Tiermehl geht aufgrund gesetzlicher Vorgaben in die Verbrennung und wird zur Energieerzeugung genutzt. Dieser Vorgang wird jedoch nicht vom Zweckverband TKB bewerkstelligt, sondern von externen Firmen. (Kill, 2014)

Von der SecAnim GmbH konnten diesbezüglich keine Daten ermittelt werden.

Im Jahr 2012 betrug die Schlachtmenge in Hessen knapp 70.000 t. Jedoch ist zu vermerken, dass aufgrund fehlender Daten Geflügelschlachtungen nicht in diesen Betrag mit einbezogen wurden (Statistisches Bundesamt, 2014). Im Vergleich dazu betrug die Schlachtmenge in ganz Deutschland ca. 8 Mio. t. Dies verdeutlicht, dass Hessen nur einen Anteil von etwa 1 % an der bundesweiten Schlachtmenge aufweist und somit das Potential zur Nutzung des Phosphorgehalts tierischer Nebenprodukte sehr gering ausfällt.

Zu den anfallenden Mengen an tierischen Nebenprodukten in Hessen sind für keine der drei Kategorien genauere Angaben vorhanden (Lautenschläger, 2014). Außerdem wird ein Großteil der Produkte weiterverarbeitet, weswegen eine P-Rückgewinnung nicht sinnvoll ist. Wie zuvor erwähnt, besteht die einzige Möglichkeit der Rückgewinnung in dem beseitigungspflichtigen Material der

4. Möglichkeiten zur Nutzung des Phosphorgehalts tierischer Nebenprodukte

Kategorie 1 (und teilweise Kategorie 2). Diese machen jedoch nur einen gewissen Prozentsatz an der Menge an tierischen Nebenprodukten aus.

Da das P-Potential in Hessen niedrig ist, lohnt sich eine deutschlandweite Betrachtung der Daten zu tierischen Nebenprodukten. Dies kann Aufschluss über das Phosphor-Potential geben und ob Strategien zur Phosphor-Rückgewinnung in diesem Bereich generell wirtschaftlich sinnvoll sind.

4.2. Bundesweite Betrachtung

Insgesamt betrug bundesweit die Menge an angefallenen tierischen Nebenprodukten der Kategorien 1 und 2 im Jahr 2010 ca. 1,25 Mio. t und Material der Kategorie 3 einschließlich Lebensmittelfette ca. 1,72 Mio. t. Aus den tierischen Nebenprodukten der Kategorie 3 wurden ca. 222.000 t Futtermittel für Heimtiere erzeugt, die somit nicht für eine Phosphor-Rückgewinnung zur Verfügung stehen. Tierfette weisen nur ein sehr geringes P-Potential von ca. 0,1 % auf und können somit vernachlässigt werden. Tabelle 8 zeigt die Verwendung der tierischen Nebenprodukte der 3 Kategorien. (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Tabelle 8 - Verwendung der tierischen Nebenprodukte der Kategorien 1 – 3 im Jahr 2010 (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Erzeugnisse	Futtermittel [t]	Düngung [t]	Thermische Verwertung [t]
Fleisch- und Knochenmehl (K1)			250.500
Fleisch- und Knochenmehl (K2)		44.000	193
Tierische Nebenprodukte (K3) und Lebensmittelfette	222.500	175.600	

Etwa 44.000 t aus Material der Kategorie 2 und ca. 176.000 t aus Material der Kategorie 3 werden bereits als Düngemittel eingesetzt. Dabei ist die Nutzung des Phosphors durch adäquate Behandlungen sicherzustellen. Folgende Tabelle beschreibt das P-Potential bezogen auf die angefallene Masse:

Tabelle 9 - Phosphor-Potential bezogen auf die angefallene Masse im Jahr 2010 (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Erzeugnis	Masse [t]	P-Fracht [%]	P-Potential [t]
Fleisch- und Knochenmehl (K1)	ca. 250.000	3,1	7.750
Fleisch- und Knochenmehl (K2)	ca. 44.000	3,1	1.364
Tierische Nebenprodukte (K3) und Lebensmittelfette	ca. 176.000	6,1	10.736
Gesamt			19.850

Material der Kategorie 1 besitzt das größte ungenutzte P-Potential mit ca. 7.750 t. Gegenwärtig werden diese Produkte energetisch genutzt oder durch Verbrennung beseitigt. Durch eine Monoverbrennungsanlage könnte dieses Potential ausgeschöpft werden, jedoch müssen dabei die hygienischen Anforderungen der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 Rechnung tragen. Nach Artikel 32

Satz 1 und 1 a der Verordnung in Verbindung mit Artikel 36 Abs. 1 ist eine Verwendung von Aschen der Kategorie 1 im Düngemittelbereich ausgeschlossen. Um das vorhandene P-Potential nutzen zu können, ist eine Anpassung der einschlägigen Vorschriften notwendig. (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Die geringe Wasserlöslichkeit des Phosphors, der aus tierischen Nebenprodukten und deren Aschen gewonnen wird, wirkt sich negativ auf die Pflanzenverfügbarkeit aus. Weitere Behandlungsschritte sind von Nöten, um die Löslichkeit bzw. die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors zu verbessern. (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Ein Vorteil der Nutzung des Phosphors aus der Asche von tierischen Nebenprodukten ist die Abwesenheit von bestimmten Stoffen, wie z.B. Arzneimittelrückstände, die somit nicht in der Umwelt verbreitet werden. Solange jedoch auf EU-Ebene keine Zulassung von Verbrennungsrückständen von Kategorie-1-Material zur Herstellung von Düngemitteln besteht, besitzt die Entwicklung einer Strategie zum P-Recycling aus tierischen Nebenprodukten nur geringen Stellenwert. Trotz dieser Tatsache werden im nächsten Unterpunkt zwei Rückgewinnungsverfahren kurz beschrieben.

4.3. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Tiermehl

Für eine P-Rückgewinnung aus Tiermehlaschen werden verfahrenstechnisch ähnliche Methoden verwendet, wie für Klärschlammaschen. Grundvoraussetzung ist auch hier die Monoverbrennung von Tiermehlen. Der Hauptbestandteil der Asche setzt sich aus Hydroxilapatit, Calcit und Whitlockite zusammen und ist nahezu frei von Schwermetallen. In Form von Hydroxilapatit ist Phosphor schwer löslich und damit nur langfristig für Pflanzen verfügbar. Vor der Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen ist eine Überführung des Hydroxilapatits in leicht lösliche P-Verbindungen empfehlenswert.

Ein mögliches Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Aschen tierischer Nebenprodukte ist das Mephrec® Verfahren, das auch Anwendung beim P-Recycling aus Klärschlamm und Klärschlammaschen findet und auf Seite 95 genauer beschrieben wird. (Grünes, et al., 2014)

Ein anderes Verfahren stellt das ULOPHOS Verfahren dar. Dieses beinhaltet das Sintern von Tiermehl mit Silizium und Natriumcarbonat bei 1.000° C im Drehofen. Dabei entstehen Sinterphosphate, die CaNa-Phosphate enthalten, welche eine bedeutend höhere Löslichkeit als die im Großteil in Tiermehlaschen enthaltenen Ca-Phosphate (Apatite) aufweisen.

Zusammengefasst ist der Aufwand beider Verfahren höher als bei der P-Rückgewinnung aus Abwasser, jedoch können deutlich höhere P-Ausbeuten erzielt werden. Um ein Produkt mit geringen Schadstoffgehalten und gewünschter Pflanzenverfügbarkeit zu erhalten, sind wie bei den Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen mehrere Verfahrensschritte notwendig, was sich unweigerlich auf die Verfahrenskosten auswirkt. (Grünes, et al., 2014)

5. Stand der Verwertung von Bioabfall und P-Nutzung in Hessen

Die Bioabfallverordnung (BioAbfV) regelt die Rahmenbedingungen für die qualitativ und quantitativ schadlose Verwertung von Bioabfällen zu Dünge Zwecken (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1998). Gemäß BioAbfV §2 (1) sind Bioabfälle: „Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder aus Pilzmaterialien zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können, einschließlich Abfälle zur Verwertung mit hohem organischen Anteil tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder an Pilzmaterialien.“⁴

Nach dem Abfallwirtschaftsplan Hessen sind Bioabfälle „überwiegend biogene Küchen- und Gartenabfälle aus privaten Haushaltungen, aber auch pflanzliche Abfälle aus öffentlichen Grün- und Parkanlagen.“⁵

Bundesweit gibt es bezüglich der Definition von Bio- und Grünabfällen jedoch große Unterschiede. Um landesweit eine Umsetzung der formulierten Ziele der Abfallwirtschaftspläne auf einheitlicher Basis zu gewährleisten und die länderübergreifende Bewertung zu standardisieren und zu vereinfachen, ist eine Präzisierung der Nomenklatur von Bio- und/oder Grünabfällen notwendig. (Grundmann, 2014)

5.1. Aufkommen und Phosphorgehalt von Bio- und Grünabfällen

Im Jahr 2012 wurde für Hessen folgendes Aufkommen an Bio- und Grünabfällen ermittelt (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013):

Tabelle 10 - Zusammenfassung der Werte des Bio- und Grünabfallaufkommens 2012 (gerundete Werte)

	Aufkommen
Gesamtmenge Bio- und Grünabfälle	765.000 t
Bioabfälle (Biotonne)	498.000 t
Grünabfälle (Garten- und Parkabfälle)	266.000 t
Einwohnerspezifisches Bio- und Grünabfallaufkommen	127 kg/E
Einwohnerspezifisches Bioabfallaufkommen (Biotonne)	83 kg/E
Einwohnerspezifisches Grünabfallaufkommen	44 kg/E
Stofflich verwertete Menge	687.000 t
Energetisch verwertete Menge	78.000 t

E = Einwohner

Im Vergleich mit den anderen Bundesländern liegt Hessen in der Summe der spezifischen Erfassung von Bio- und Grünabfällen über dem bundesweiten Durchschnitt. Im Bereich der Erfassung des Bioabfalls privater Haushalte (über die Biotonne) belegt Hessen sogar die bundesweit höchste

⁴ Bioabfallverordnung, §2 (1)

⁵ Abfallwirtschaftsplan Hessen (2010), S. 20

5. Stand der Verwertung von Bioabfall und P-Nutzung in Hessen

spezifische Erfassungsquote (siehe Abbildung 5). (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013)

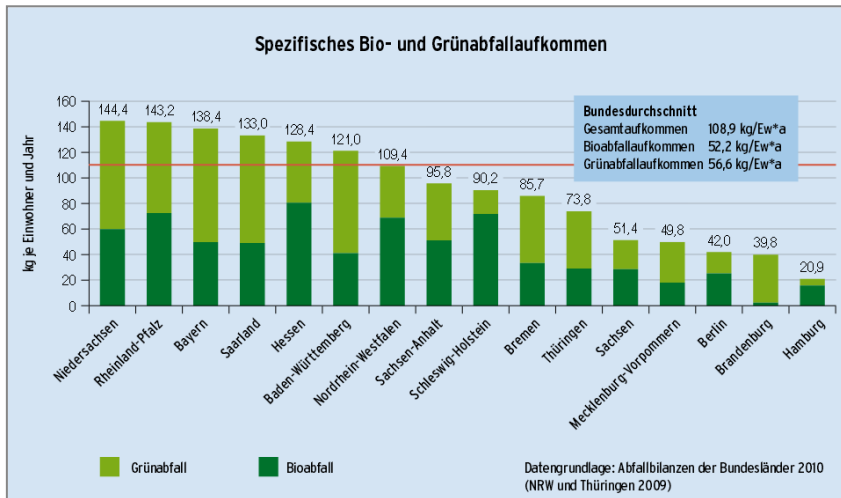


Abbildung 5 - Bundesweite Betrachtung der spezifischen Erfassung von Bio- und Grünabfällen (M. Kern, 2012)

Um einen Anhaltspunkt zu erhalten, welche Mengen an Phosphat im Bioabfall bzw. im Bioabfallkompost enthalten sind, können Daten der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. verwendet werden (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.). Tabelle 11 zeigt den Gehalt an Phosphor in verschiedenen organischen Düngemitteln.

Tabelle 11 - Gehalt an Phosphor in organischen Düngemitteln (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.)

Organischer Dünger	Gehalt P ₂ O ₅ kg/t FM (Frischmasse)
Fertigkompost	4,1
Frischkompost	4,8
Gärprodukt fest	7,7
Gärprodukt flüssig	2,1
Festmist (Rind)	3,9
Gülle (Rind)	1,7
Gülle (Schwein)	2,8
Stroh (Getreide)	3,0
Gründüngung, Rübenblatt	0,7

Demnach enthält Frischkompost 4,8 kg P₂O₅/t FM. Nach den Ergebnissen des Landesbetriebs Landwirtschaft Hessen beträgt der Gehalt an P₂O₅ im Bioabfallkompost 5,0 kg/t FM, wie Tabelle 12 zu entnehmen ist (Bernhard, 2012):

Tabelle 12 - Nährstoffgehalte organischer Düngemittel (Bernhard, 2012)

Komposte	TS	ges. N	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S
Einheit	%	kg/t	kg/t	kg/t	kg/t	kg/t	kg/t
Kompost	67,5	13,0	1,0	5,0	9,0	8,0	2,0
Bioabfallkompost	52,0	16,0	1,0	5,0	11,0	7,0	2,0
Grüngutkompost	57,0	12,0	< 1,0	4,0	9,0	9,0	1,0
Klärschlammkompost	32,0	0,9	2,0	13,0	3,0	4,0	2,0

Für die weiteren Berechnungen wird der Mittelwert der beiden Werte bezüglich des Phosphatgehalts in Bioabfallkompost verwendet: 4,9 kg P₂O₅/t FM.

Grüngutkompost weist hingegen einen etwas geringeren Phosphatgehalt von 4 kg P₂O₅/t FM auf.

Während des Kompostierungsprozesses erfolgt ein Um- und Abbau der organischen Substanz. Zudem bewirkt die Selbsterhitzung des Bioabfallmaterials eine Wasserverdunstung. Deshalb kann die Menge an gesammelten Bioabfällen nicht gleich der Menge an Bioabfallkompost gesetzt werden. Laut einer Untersuchung des Witzenhausen-Instituts verbleiben durchschnittlich 46 % Kompost, je verarbeiteter Tonne Bioabfall. Bei Grünabfall beträgt der verbleibende Kompostanteil ca. 37 % je Tonne Grünabfall. (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008)

Umgerechnet auf die Gesamtmenge an Bioabfall im Jahr 2012 (498.348 t), resultieren daraus rd. 230.000 t Bioabfallkompost. Im Bereich Grünabfall ergeben sich ca. 100.000 t Grünabfallkompost. Mithilfe des zuvor ermittelten Phosphatgehalts, liegen im Bioabfallkompost theoretisch rd. 1.150 t P₂O₅ und im Grünabfallkompost rd. 400 t P₂O₅ vor. Schließlich kann mit einem Potential von ca. 1.550 t P₂O₅ im Bereich Bio- und Grünabfall gerechnet werden.

5.2. Erfassung von Bio- und Grünabfällen

Der aktuelle Stand der Erfassung und Verwertung von Bioabfällen in Hessen bezieht sich auf die durch das Witzenhausen-Institut durchgeführte Studie zur „Optimierung der biologischen Abfallbehandlung in Hessen“ von 2007 und die Aktualisierung (2012) von Daten zu dieser Studie (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008) (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013). Im Rahmen der Studie erfolgte eine Befragung der 29 öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (öRE) und Kreisausschüsse in Hessen sowie 49 Kompostanlagen mit einem Jahresdurchsatz von über 1.000 t/a. Das Ergebnis gibt Aufschluss über die Organisationsstrukturen der Bio- und Grünabfallerefassung, des Mengenaufkommens und der jeweiligen Gebührenstrukturen der öRE. Aufgrund von Änderungen in den letzten Jahren bei der Erfassung überlassungspflichtiger biogener Abfälle und insbesondere deren Behandlung, gab das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz eine Aktualisierung dieser Studie in Auftrag. Das Witzenhausen-Institut führte erneut eine Befragung der 29 öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger und Kreisausschüsse durch, um den aktuellen Stand der Erfassung und Verwertung von Bioabfällen sowie von Park- und Grünabfällen zu erhalten. Lediglich der Kreis Offenbach gab bei der zweiten Befragung keine Rückmeldung, weswegen hierzu keine Daten vorhanden sind. (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013)

Trotz des hohen Erfassungsgrads an biogenen Abfällen aus privaten Haushalten im Vergleich zu anderen Bundesländern, gibt es öRE mit unterdurchschnittlicher spezifischer Erfassung (z.B. Hochtaunuskreis) und zwei⁶ öRE, die über kein Angebot einer getrennten Bioabfallerrfassung verfügen (Vogelsbergkreis und Schwalm-Eder-Kreis).

Im Bereich Grünabfall bieten mit Ausnahme des Werra-Meißner-Kreises alle hessischen öRE die Möglichkeit zur Erfassung von Garten- und Parkabfällen (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013).

Laut § 11 Abs. 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sind ab 01.01.2015 alle Entsorgungsträger gesetzlich verpflichtet, überlassungspflichtige Bioabfälle aus Haushalten getrennt zu sammeln, soweit es für die Erfüllung der Verwertungspflichten erforderlich ist. Dabei beinhaltet der definierte Begriff überlassungspflichtige Bioabfälle neben Gartenabfälle auch Küchenabfälle, wodurch Maßnahmen zur Getrennterfassung immer für beide Abfallstoffe entwickelt werden müssen (Wiemer, et al., 2014). Somit sollten die Anwohner aller öRE in Hessen ab 2015 über das Angebot einer getrennten Bioabfallerrfassung verfügen. Jedoch besteht kein Nutzungszwang, d.h. die Nutzung der getrennten Bioabfallerrfassung (Biotonne) basiert auf freiwilliger Basis, weswegen weiterhin mit Verlusten zu rechnen ist.

5.3. Verwertung und Verbleib von Bio- und Grünabfall

Grundsätzlich finden drei verschiedene Entsorgungswege Anwendung (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008):

- Kompostierung
- Vergärung mit anschließender Kompostierung (Kaskadennutzung)
- Energetische Verwertung

Die Anzahl an Anlagen zur Behandlung von Bio- und Grünabfällen mit einem Durchsatz von über 1.000 t/a beträgt 49. Davon werden 26 Anlagen zur Behandlung von Bioabfällen mit anteiliger Mitbehandlung von begrenzten Mengen an Grünabfällen als Strukturmaterialien genutzt. Die restlichen 23 Anlagen sind ausschließlich Kompostierungsanlagen für separat erfasste Grünabfälle. Die 26 Bioabfallkompostierungsanlagen sind aufgeteilt in 12 Anlagen zur Mietenkompostierung, 12 Anlagen zur Boxen-/Containerkompostierung und 2 Anlagen zur Tunnelkompostierung. Bei den Grünabfällen erfolgt die Kompostierung zumeist in offenen Mietensystemen. Systeme mit Kapselung

⁶ Nach der aktualisierten Studie des Witzenhausen-Instituts sind drei öRE ohne Angebot einer Biotonne. Seit April 2014 wurde jedoch die Biotonne in Offenbach eingeführt, weswegen nur noch zwei öRE ohne Angebot einer Biotonne sind. (Stadtwerke Offenbach Holding, 2014)

des Intensivrottebereichs bzw. mit Zwangsbelüftung sind aufgrund des höheren technischen Aufwands eher selten (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2008).

Eine Optimierungsmöglichkeit im Hinblick auf die stoffliche Verwertung stellt die Kaskadennutzung dar, die umweltverträglicher und ressourcenschonender ist, als die alleinige Kompostierung. Das durch eine Vergärung und anschließende Nachkompostierung des Bioabfalls erzeugte Substrat eignet sich gleichermaßen, wie durch eine ausschließliche aerobe Kompostierung. Der Nährsalzgehalt von nachkompostierten Substraten aus der Vergärung ist geringer, wodurch der Einsatz als Erde oder Substrat im Gartenbau erleichtert wird. Durch die energetische Nutzung des erzeugten Biogases bei der anaeroben Behandlung fällt die Energiebilanz zudem positiver aus. Nachteilig ist momentan noch die Emission von entstehenden Gasen, wie z.B. Methan oder Lachgas, vor allem während der Phase des Übergangs aus der Vergärung in die Nachrotte. (LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2010)

Der bei der Vergärung erzeugte Frischkompost oder flüssige Gärrückstand kann in der Landwirtschaft vermarktet werden. Bei der Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen kommt es zu Umsetzungsreaktionen mit entsprechenden Emissionen, dafür sind infolge der Vergärung höhere Substitutions-erfolge durch die Nutzung der Abwärme und des Biogases zu verzeichnen. (LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2010)

Je nach Bioabfallzusammensetzung und Vergärungsverfahren können aus einer Tonne Bioabfall 80 bis 140 m³ Biogas mit einem Methangehalt von 55 bis 60 % gewonnen werden. (Kern, et al., 2009) Der Energiegehalt eines Kubikmeters Methan beträgt etwa 10 Kilowattstunden. Bei einem Methananteil von 60 % ergibt sich aus 1 m³ Biogas ein energetischer Nutzen von rund 6 Kilowattstunden. Durchschnittlich kann mit einem Biogasertrag von 110 m³ pro Tonne Bioabfall gerechnet werden. Bezogen auf die knapp 500.000 t an getrennt erfassten Bioabfällen in Hessen, ergibt sich ein theoretischer Ertrag von ca. 55 Mio. m³ Biogas. Durch die energetische Verwertung in Blockheizkraftwerken können daraus ca. 100 Mio. kWh Strom (BHKW $\eta_{\text{elektrisch}} = 30\%$) und rund 198 kWh Wärme (BHKW $\eta_{\text{thermisch}} = 60\%$) produziert werden. (LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2010)

In 2012 waren in Hessen sechs Anlagen zur Vergärung überlassungspflichtiger Bioabfälle in Betrieb. Die gesamte Behandlungskapazität der Anlagen beträgt 145.000 t/a, dies entspricht knapp 30 % des derzeit erfassten Bioabfalls, die in eine kaskadenartige energetische Nutzung gehen. Zusammen erzeugen diese sechs Anlagen rund 14 Mio. m³/a Biogas. Nicht in die Betrachtung mit aufgenommen wurden Anlagen zur Vergärung von gewerblichen Bioabfällen.

Abbildung 6 zeigt die einzelnen öRE aufgeteilt nach der Behandlungsart für deren Bioabfälle. (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013)

5. Stand der Verwertung von Bioabfall und P-Nutzung in Hessen

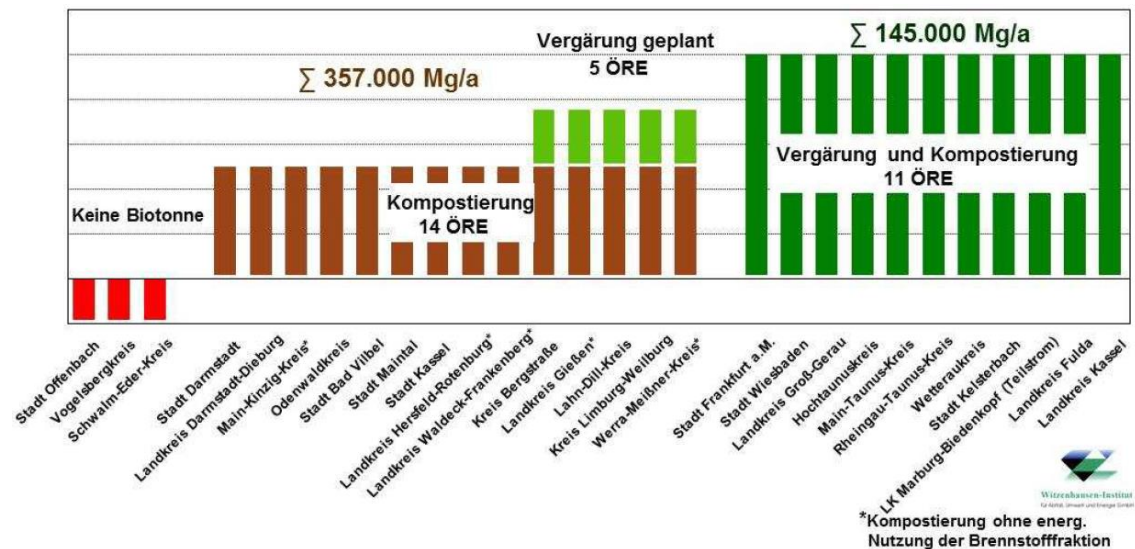


Abbildung 6 - Behandlung der Bioabfälle in den jeweiligen öRE (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013)

Wie bereits zuvor erwähnt, hat die Stadt Offenbach seit April 2014 die Biotonne eingeführt. Der gesammelte Bioabfall wird der Vergärungsanlage in Frankfurt zugeführt. (Stadtwerke Offenbach Holding, 2014)

Zwei weitere Umsetzungen von Bioabfallvergärungsanlagen in Hessen sind derzeit geplant oder bereits abgeschlossen:

- Heppenheim (Landkreis Bergstraße): Ausschreibung für eine Boxenvergärung inklusive BHKW mit einer Kapazität von 31.000 t/a
- Stausebach (Landkreis Marburg-Biedenkopf): Boxenvergärung mit einer Kapazität von 30.000 t/a Bioabfall in Verbindung mit einer NawaRo-Vergärung und gemeinsamer Gasaufbereitung und Einspeisung

Weitere Bioabfallvergärungsanlagen stehen in den Landkreisen Gießen, Lahn-Dill, Limburg-Weilburg, Waldeck-Frankenberg und Werra-Meißner zur Diskussion (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013).

Seit der Novellierung der BioAbfV (2012) gelten im Bereich der Behandlung und Nutzung von Grünabfällen im Grundsatz die Behandlungs- und Untersuchungspflichten wie bei allen anderen Bioabfällen. Dadurch ist eine Hygienisierung der Grünabfälle durchzuführen und nachzuweisen. Außerdem ist bei der Nutzung als Kompost durch entsprechende Zerkleinerung und/oder Siebung sicherzustellen, dass die Stückigkeit der Materialien eine Siebmaschenweite von 40 mm nicht überschreitet. In der Praxis besteht somit nicht mehr die Möglichkeit, Grünabfall lediglich zu häckseln und landwirtschaftlich auszubringen.

5. Stand der Verwertung von Bioabfall und P-Nutzung in Hessen

Abbildung 7 zeigt die Behandlung der Grünabfälle in den jeweiligen öRE. In 18 öRE findet eine Ausschleusung holziger Anteile und deren Nutzung und/oder Vermarktung als biogene Brennstoffe statt. In drei öRE werden Anteile des Grünabfalls neben der Kompostierung mit energetischer Verwertung einer Vergärung zugeführt.

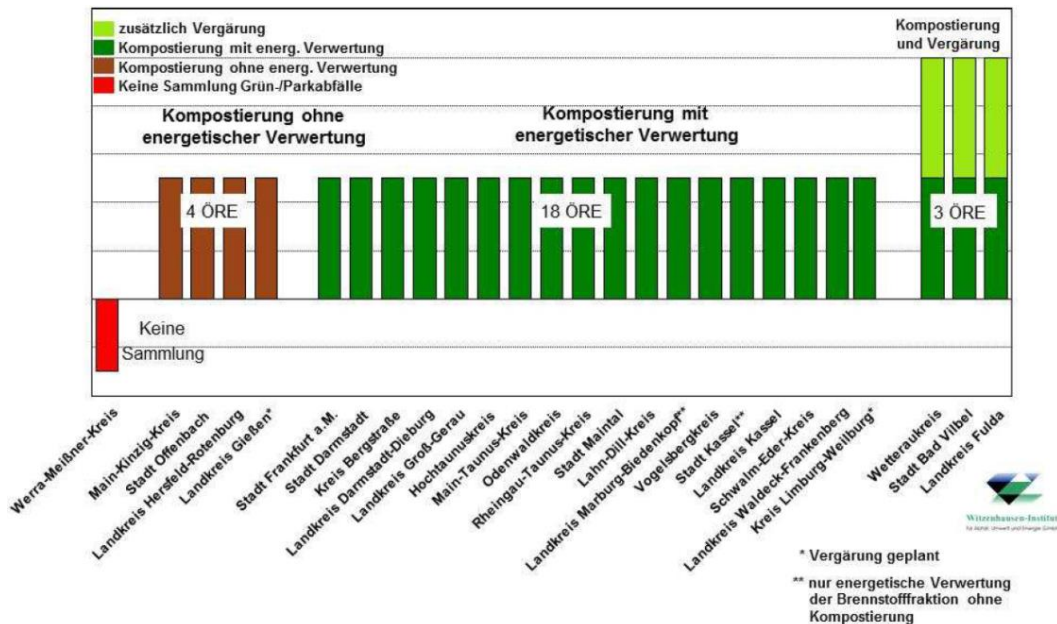


Abbildung 7 - Behandlungsart der Grünabfälle in den jeweiligen öRE (Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Januar 2013)

5.4. Potential Bioabfälle

Trotz der sehr hohen spezifischen Erfassungsquote wird im Bereich Bioabfall das Potential noch nicht vollständig ausgeschöpft. Wie bereits zuvor erwähnt, gehen etwa 10 % der erfassten Grünabfälle in die energetische Verwertung, wodurch der Phosphor nicht mehr verfügbar ist (nicht berücksichtigt ist hierbei die Nutzung bzw. Rückgewinnung aus der Asche). Dies umfasst 77.831 t an Bioabfall mit einer Phosphatmenge von ca. 175 t. Durch die vermehrte thermische Nutzung entsteht ein Zielkonflikt zwischen dieser und der stofflichen Verwertung des Stoffstroms Bioabfall. Infolge der thermischen Nutzung erfolgt eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, jedoch bleibt die Wertschöpfung von Phosphor aus, die nur bei der stofflichen Nutzung gegeben ist.

Ein noch viel größeres Potential befindet sich im Restmüll. Laut den Ergebnissen von bundesweit durchgeführten Hausmüllanalysen des Witzenhausen-Instituts⁷ werden durchschnittlich ca. 40 % Bioabfall über den Restmüll entsorgt. Dieser Anteil setzt sich aus Garten-, Küchen- und Speiseabfällen

⁷ 1.138 Einzelstichproben (je 1m³) aus 25 öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern in acht Bundesländern

sowie aus der nativen Organik der Fein- und Mittelfraktion (< 10 mm bzw. < 40 mm) und dem Anteil an verpackten Lebensmitteln zusammen. Absolut betrachtet ergibt sich daraus ein Wert von ca. 60 kg Bioabfällen, die pro Einwohner und Jahr im Restmüll landen. (Wiemer, et al., 2014)

Die erfasste Gesamtmenge an Restmüll in Hessen im Jahr 2012 betrug 1.011.735 t (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013). Der Hauptanteil wird in Müllheizkraftwerken verbrannt. Basierend auf den 40 % an Bioabfällen im Restmüll, resultiert daraus ein theoretischer Wert von 404.694 t Bioabfall im Restmüll. Infolge einer stofflichen Verwertung könnte daraus Kompost im Umfang von 186.159 t mit einer Phosphatmenge von 912 t P_2O_5 erzeugt werden. Dieses Potential geht somit ungenutzt dem Nährstoffkreislauf verloren.

In Hessen können die Haushalte im Hinblick auf die Nutzung einer Biotonne in drei Gruppen eingeteilt werden: Biotonnennutzer, Haushalte ohne Biotonne bzw. Eigenkompostierung und Haushalte ohne separate Bioabfall erfassung. Der Unterschied zwischen Haushalten ohne Biotonne und Haushalten ohne separate Bioabfall erfassung liegt darin, dass die Haushalte ohne Biotonne über das Angebot einer separaten Bioabfall erfassung verfügen, jedoch das Angebot nicht wahrnehmen und selbst kompostieren. Bei der differenzierten Betrachtung der Zusammensetzung der Bioabfälle im Restmüll wird deutlich, dass bei allen drei Gruppen der Anteil an Speiseabfällen im Restmüll nahezu identisch ist. (Wiemer, et al., 2014)

Abbildung 8 zeigt den mittleren Anteil an Bioabfällen im Restmüll und Abbildung 9 die Zusammensetzung der nativen Organik im Hausabfall differenziert nach Biotonnennutzern, Haushalten ohne Biotonne sowie Haushalte ohne separate Bioabfall erfassung.

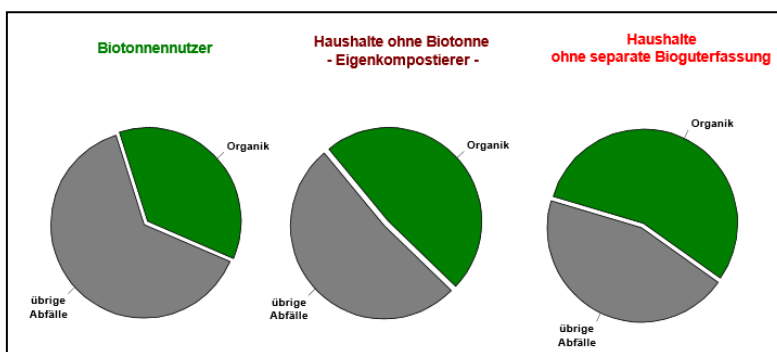


Abbildung 8 - Durchschnittlicher Anteil der Bioabfälle im Restmüll (Wiemer, et al., 2014)

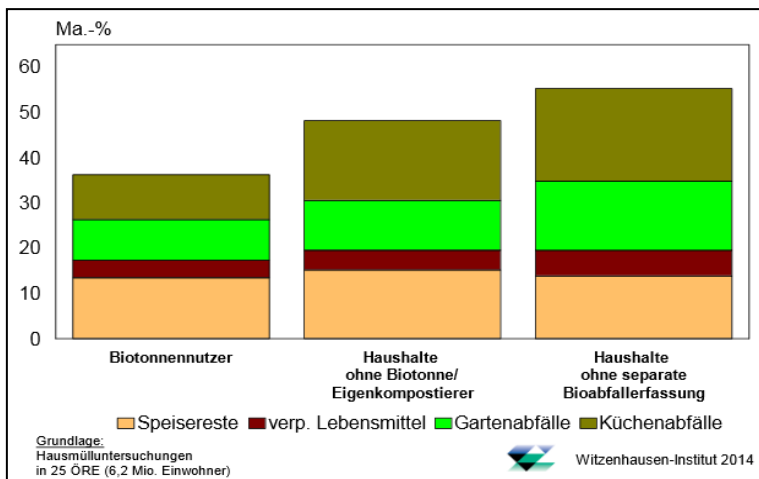


Abbildung 9 - Zusammensetzung der nativen Organik im Restmüll (Wiemer, et al., 2014)

Auffallend ist der mit ca. 36 % hohe Anteil an Bioabfällen bei den Biotonnennutzern, wobei Speisereste die größte Fraktion darstellten. Aus Abbildung 9 wird deutlich, dass Speiseabfälle größtenteils über den Restmüll entsorgt werden, unabhängig von der Art der Bioabfalleffassung. Lediglich im Bereich der Küchen- und Gartenabfälle können Unterschiede bei den verschiedenen Nutzergruppen festgestellt werden.

Insbesondere die Speisereste sind von großer Bedeutung, da sie mit ihrem hohen Anteil an Fetten, Aminosäuren und Zuckern einen überproportional hohen Energieeintrag bei der Biogasferzeugung in der Abfallvergärung liefern und für die gewünschte energetische und stoffliche Nutzung (Kaskadennutzung) von Bioabfall geradezu prädestiniert sind. Somit gehen Ressourcenpotentiale unweigerlich verloren, was den Zielen einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft widerspricht. Folglich sind in Zukunft Maßnahmen zu treffen, die der Entsorgung von Bioabfällen über den Restmüll entgegenwirken. (Wiemer, et al., 2014)

Ein weiteres Potential befindet sich in dem organischen Material, das eigenkompostiert wird. Pro Jahr beträgt der Wert der Eigenkompostierung in Deutschland Schätzungen zu Folge 95 kg pro Einwohner (Wiemer, et al., 2014). Da zu diesem Bereich keine spezifischen Daten für Hessen vorhanden sind, werden die Werte nach den Ergebnissen der deutschlandweiten Studie des Witzenhausen-Instituts verwendet. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung von 6.016.000 in Hessen (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012), ergeben sich 571.520 t an eigenkompostierten Bioabfällen. Daraus ergibt sich wiederum eine Kompostmenge von 262.900 t mit einer Phosphatmenge von rd. 1.290 t P_2O_5 . Die im Kompost enthaltenen Stoffe, wie Phosphor, werden zurück in den Nährstoffkreislauf geführt, weswegen in diesem Bereich keine Verluste zu verzeichnen sind. (Wiemer, et al., 2014)

Durch illegale Entsorgung (z.B. Entsorgung von Gartenabfällen in Wäldern oder Wegseitengräben) oder Verbrennung im privaten Bereich ist hingegen mit Verlusten zu rechnen. Obwohl Phosphor bei einer Entsorgung in der Natur zurück in die Umwelt gelangt, sind damit negative Auswirkungen verbunden, wie z.B. Übersäuerung des Bodens oder Überdüngung von Gewässern. Pro Jahr wird bundesweit mit 5 kg pro Einwohner gerechnet. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung von 6.016.000 in Hessen, ergibt sich daraus ein Wert von 30.080 t. (Wiemer, et al., 2014) (Hessisches Statistisches Landesamt, 2012)

Als letzten Aspekt müssen noch sonstige Entsorgungswege, wie z.B. die Kanalisation, in Betracht gezogen werden. Hier wird bundesweit von 10 kg pro Einwohner und Jahr ausgegangen. Umgerechnet auf die hessische Bevölkerung ergibt sich daraus ein Wert von 60.160 t pro Jahr (Wiemer, et al., 2014). Ein Teil davon gelangt in kommunale Kläranlagen, wo der enthaltene Phosphor im Klärschlamm gebunden ist und für eine Rückgewinnung zur Verfügung steht. Genaue Angaben hierzu sind jedoch nicht vorhanden.

Folgende Tabelle fasst das vorhandene, sowie das genutzte und ungenutzte P-Potential der unterschiedlichen „Entsorgungsarten“ zusammen:

Tabelle 13 - Bilanzierung der P-Potentiale im Bioabfall

Stoffstrom	Menge [t]	P-Potential (P ₂ O ₅) gesamt [t]	P-Potential (P ₂ O ₅) genutzt [t]	P-Potential (P ₂ O ₅) verloren [t]
Bio- und Grünabfall	764.674	1.550	1.375	175
Bioabfall im Restmüll	404.694	912	0	912
Eigenkompostierung	571.520	1.288	1.288 ¹⁾	0
Illegale Entsorgung	30.080	67,8	0	67,8
Sonst. Entsorgung	60.160	135,6	0	135,6
Gesamt	1.831.128	3.953,4	2.663	1.290,4

¹⁾Zur Eigenkompostierung sind keine Daten vorhanden, ob das P-Potential vollständig genutzt wird. Dieser Wert wird zur Vereinfachung angenommen.

5.5. Empfehlungen zur Optimierung der Bioabfallfassung

Die getrennte Erfassung und die stoffliche bzw. kombinierte stofflich-energetische Verwertung von Bio- und Grünabfällen ist eine effektive Maßnahme zur Rückführung biogener Stoffe in den Naturkreislauf und trägt dadurch zum Ressourcenschutz bei.

Bevor Maßnahmen zur Optimierung in der Bioabfallfassung greifen, wäre zuerst eine Abfallvermeidung, in Form einer Eigenverwertung durch Eigenkompostierung, erstrebenswert. Die Umsetzung hängt jedoch von mehreren Faktoren ab: (Gallenkemper, et al., 2008)

- Gartengröße
- Angebot der Erfassungssysteme für Bio- und Grünabfälle
- Gebührensystem
- Bereitschaft der Bürger zur Umsetzung

Unter ökologischen Aspekten wird die Eigenkompostierung grundsätzlich als positiv bewertet, jedoch sind viele Nahrungs- und Küchenabfälle nur bedingt oder gar nicht dafür geeignet. Vor allem für gekochte Speiseabfälle, verdorbene Lebensmittel oder tierische Küchenabfälle und Speisereste ist aufgrund des Schwefel-, Stickstoff- und Kohlenstoffgehalts auf eine ausreichende Sauerstoffversorgung während der Kompostierung zu achten, um u.a. Geruchsentwicklungen zu vermeiden. Ein weiteres Problem besteht in der Gefahr des Anlockens von Schädlingen, wie z.B. Ratten, bei offenen oder teilgeschlossenen Systemen. Bei der Eigenkompostierung von tierischen Küchenabfällen und Speiseresten ist eine erforderliche Hygienisierung nicht sicher gewährleistet. Darüber hinaus ist ein ausreichender Bedarf an Gartenfläche erforderlich, um eine Überdüngung der Flächen und eine möglicherweise einhergehende Grundwassergefährdung auszuschließen.

Zukünftig wird eher mit einer Abnahme des Anteils der Eigenkompostierung gerechnet, aufgrund der kleiner werdenden Gartengrößen, der zunehmenden Anteile an Ziergarten- und Rasenflächen sowie veränderter Lebensgewohnheiten. Daher sollten sich die Biotonne und die Eigenkompostierung sinnvoll ergänzen. (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014)

Trotz der hohen spezifischen Erfassungsquote von Bio- und Grünabfällen in Hessen, sollten weitere Handlungsoptionen entwickelt werden, die zur Optimierung des Erfassungssystems und somit zur Steigerung der Wertschöpfung beitragen. Folgend sind einige Handlungsempfehlungen aufgeführt, die zu einer zusätzlichen Erhöhung der spezifischen Bioabfallerrfassung führen können:

Satzungsregeln

In den Satzungsregelungen zum Stoffkatalog für die Biotonne sollte ein Anschluss- und Benutzungszwang verankert werden, um eine möglichst umfassende Nutzung der Biotonne mit entsprechend hoher Bioabfallabschöpfung zu erzielen. In Gebieten, in denen kein Pflichtanschluss möglich ist, könnte durch bestimmte Maßnahmen (z.B. Gebührenanreiz) eine freiwillige Nutzung gefördert werden, um trotzdem eine möglichst umfassende Bioabfallabschöpfung zu erreichen. Zudem sollte ein Ausschluss bestimmter Nahrungs- und Küchenabfälle aus der Biotonne nicht betrieben werden. Fleisch- und Fischabfälle sowie gekochte Speisereste können zu unangenehmen Begleiterscheinungen (z.B. Geruchsentwicklung, Madenbildung) führen, jedoch weisen diese ein

hohes Biogaspotential auf und sind für eine Vergärung besonders geeignet. (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014)

Gebührengestaltung

Ein Gebührenanreiz könnte zur Unterstützung der getrennten Erfassung der Bioabfälle führen. Möglichkeiten hierfür wären eine Einheitsgebühr mit Verzicht auf eine Biotonnengebühr oder eine gegenüber dem Restabfall geringere Gebühr bei der Nutzung der Biotonne. Bei der Entscheidung für die passende Gebührengestaltung sollten die Siedlungsstruktur, die sonstige Gebührenstruktur und die Sicherstellung einer hohen Qualität der Bioabfälle berücksichtigt werden. (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014)

Abfuhr und Qualitätskontrolle

Zur Akzeptanzsteigerung kann das Leerungsintervall an verschiedene Gegebenheiten angepasst werden (z.B. kürzeres Intervall im Sommer aufgrund möglicher Geruchsbelästigungen). Probleme mit erhöhten Störstoffanteilen können mithilfe stichprobenartiger Kontrollen der Biotonneninhalte und entsprechender Folgemaßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit entgegengewirkt werden. (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014)

Öffentlichkeitsarbeit

Die Öffentlichkeitsarbeit sollte intensiviert und kontinuierlich durchgeführt werden. Besonders in Ballungsräumen ist eine Anpassung der Art und Gestaltung der Maßnahmen an die Mentalität und Sprachkenntnisse erforderlich. Die Öffentlichkeitsarbeit sollte Einrichtungen, wie z.B. Schulen, Kindergärten, Vereine sowie Hausmeister und Hausverwaltungen in die Planung miteinbeziehen. (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014)

Empfehlungen zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen

Die präferierte Behandlungsmethode stellt die Kaskadennutzung einschließlich einer Vergärungsstufe dar. Bei Neuplanungen von Bioabfallbehandlungsanlagen sollte dieses System angestrebt werden. Landkreise mit eigenen Kompostwerken oder kreisfreie Städte sollten prüfen, ob eine Integration einer Vergärungsstufe bei den Behandlungsanlagen, bei gleichzeitiger Steigerung der Durchsatzmenge, möglich ist.

Bei Grünabfällen sind bestimmte Teilströme (z.B. holzige Anteile) nicht für eine solche Behandlungsweise geeignet, weswegen diese getrennt einer energetischen Verwertung zugeführt werden sollten. (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014)

Neben den gängigen Systemen zur getrennten Erfassung, sind in verschiedenen Bundesländern vereinzelt alternative Systeme im Einsatz. Mithilfe dieser individuelleren Maßnahmen könnte in bestimmten Gebieten eine Erhöhung des Erfassungsgrads erreicht werden. Als Beispiel wird der „Biobeutel“ genauer beschrieben.

Der Biobeutel

Dieses System zur getrennten Erfassung von Bioabfällen ist im Ostalbkreis in Baden-Württemberg im Einsatz. Die Biobeutel sind in zwei unterschiedlichen Größen auf Rollen á zehn Stück verfügbar. Der Preis der Beutel deckt die Erfassung und Verwertung des Bioabfalls. Die Abholung erfolgt einmal wöchentlich. Aufgrund des vergleichsweise hohen Preises der Biobeutel, ist kein Eintrag von Störstoffen und Grünschnitt zu verzeichnen. Die Qualität der Speiseabfälle ist annähernd konstant, weswegen sich das Verwertungsunternehmen hauptsächlich auf die Separierung der PE-Beutel konzentriert. Aufgrund der energiereichen Speiseabfälle ist in einer Biogasanlage die Ausbeute an Rohgas deutlich höher als bei dem Abfall der Biotonne. (Wiemer, et al., 2014)

Der Vorteil für die Verbraucher besteht in dem transparenten und individuellen System, das eine Anpassung an das entsprechende Konsumverhalten zulässt. Nachteile sind die hohen Kosten für die Beutel und die spezifischen Kosten der wöchentlichen Erfassung. Diese liegen pro Mg höher als bei der herkömmlichen Erfassung, jedoch wird in der Verwertung auch nur für speiseabfallähnliche Abfälle bezahlt, während für den Grünschnitt günstigere Verwertungswege vorhanden sind. Außerdem ist die Akzeptanz des Verbrauchers zu prüfen, da ein Teil der Bürger die Biotonne dem Biobeutel vorziehen. Schwierigkeiten können beispielsweise im Winter auftreten, wenn die Beutel am Vorabend an die Straße gestellt werden. Schneefall oder Anfrieren verdeckt oder beschädigt die Beutel. Auch Tiere können die Beutel schädigen, wenn diese als Nahrungsquelle benutzt werden. (Wiemer, et al., 2014)

6. Befragung von Kläranlagen und Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Hessen

Ziel der Befragung war, einen repräsentativen Überblick über den aktuellen Stand der Phosphor-Rückgewinnung im Bundesland Hessen zu erhalten. Hierfür erfolgte eine Befragung aller Kläranlagen ab einer Größenklasse von 10.000 EW und aller Klärschlammmonoverbrennungsanlagen mithilfe von Fragebögen (siehe Anhang). Neben allgemeinen Daten zur Betriebsgröße und -weise, wurden Informationen bezüglich bestehender Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm, Schlammwasser oder Klärschlammmasche erfragt. Das Ergebnis soll Aufschluss darüber geben, in welchen Bereichen bereits Pläne oder Maßnahmen getroffen wurden bzw. wo Defizite vorliegen.

6.1. Art, Anzahl und Ausbaugröße der Kläranlagen in Hessen

2012 waren in Hessen 716 kommunale Abwasserbehandlungsanlagen in Betrieb (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013). In folgender Tabelle sind die Anlagen nach ihrer Ausbaugröße (Größenklasse) klassifiziert:

Tabelle 14 - Anzahl der hessischen kommunalen Kläranlagen und deren Ausbaugröße (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)

Größenklasse [EW]	Anzahl Kläranlagen	Ausbaugröße [EW]
50 – < 2.000	324	241.783
2.000 – < 10.000	221	1.040.302
> 10.000 – 100.000	161	5.255.243
> 100.000	10	3.735.000
Summe	716	10.272.328

Die Anzahl der Kläranlagen bis zu einer Größenklasse von 10.000 EW beträgt 545. Deren Ausbaugröße macht lediglich 13 % der Gesamtausbaugröße aus. Die restlichen 171 Anlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 10.000 EW decken hingegen 87 % der Gesamtausbaugröße ab. Dadurch ist es offensichtlich, dass die Reinigungsleistung bzw. die technische Ausstattung dieser 171 Kläranlagen von größerer Bedeutung sind.

Wichtig sind hierbei der technische Ausbau der Abwasserbehandlungsanlagen und die jeweils gegebenen Möglichkeiten zum Abbau der organischen Belastung als auch die Nährstoffelimination durch Nitrifikation, Denitrifikation und Phosphorelimination. Laut der EG-Richtlinie 91/271/EWG sind Anlagen mit einer Größenklasse von weniger als 10.000 EW nicht verpflichtet zusätzlich zur Reduzierung der organischen Belastung noch eine Nährstoffreduzierung (Stickstoff und Phosphor) durchzuführen. In den letzten Jahren wurden jedoch Anstrengungen unternommen, die zu einem Anstieg der zusätzlichen Reinigungsschritte wie Nitrifikations-/Denitrifikationsstufe oder P-

6. Befragung von Kläranlagen und Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Hessen

Elimination in kleineren Kläranlagen führte. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)

Abbildung 10 zeigt den aktuellen Verfahrensstand der hessischen kommunalen Kläranlagen nach Größenklassen und Anzahl. Ersichtlich ist die umfassende Abwasserbehandlung durch Nitrifikation, Denitrifikation und P-Elimination der Kläranlagen ab 10.000 EW.

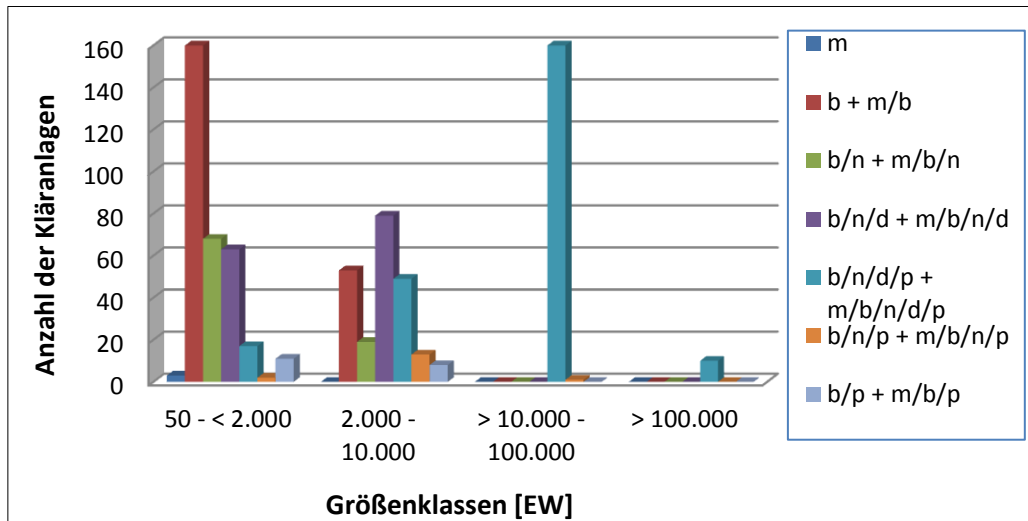


Abbildung 10 - Aktuelle Verfahrensweise (Reinigungsart) der hessischen Kläranlagen eingeteilt nach Größenklassen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)

Erläuterung:	m	=	mechanisch
	b	=	biologisch
	b/n	=	biologisch, Nitrifikation
	b/n/d	=	biologisch, Nitrifikation, Denitrifikation
	b/n/d/p	=	biologisch, Nitrifikation, Denitrifikation, P-Elimination
	b/n/p	=	biologisch, Nitrifikation, P-Elimination
	b/p	=	biologisch, P-Elimination

Für die Zielsetzung ist die genauere Betrachtung der Jahresablauffrachten für P_{ges} von größerer Bedeutung. Aus den Eigenkontrolldaten (1996 - 2011) der hessischen Kläranlagenbetreiber lässt sich für den Parameter P_{ges} folgendes Diagramm erstellen:

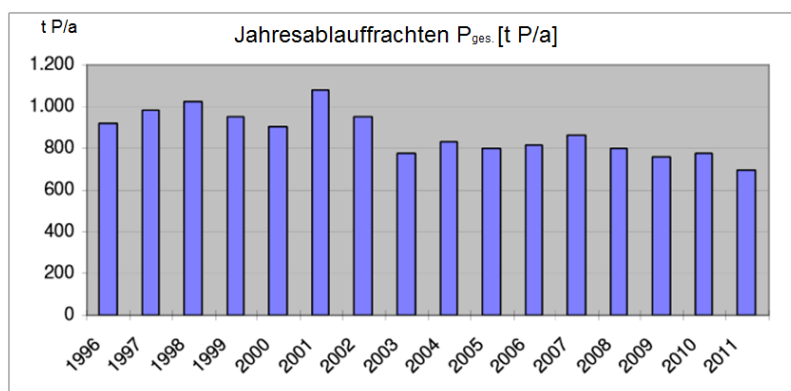


Abbildung 11 - Jahresablauffrachten P_{ges} in [t/Jahr] aus hessischen Kläranlagen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)

Über den gesamten Zeitraum (1996 - 2011) unterliegt die Jahresablauffracht Schwankungen mit abnehmender Tendenz der P-Gehalte. Außerdem beträgt die Eliminationsrate von P_{ges} bei den kleineren Anlagen (< 10.000 EW) etwa 70 bis 75%, größere Anlagen erreichen Werte von 90 bis 95 %. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)

Trotz der äußerst effektiven Eliminationsverfahren, ist im Jahr 2012 eine Jahresablauffracht von 725 t/a P_{ges} in Hessen zu verzeichnen (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2014). Diese Menge an Phosphor wird in die Gewässer und Ozeane eingeleitet und kann somit nicht mehr im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zur Nahrungsmittelherstellung genutzt werden.

6.1.1. Betrachtung der zu entsorgenden Stoffe

Während des Reinigungsprozesses fallen in kommunalen Kläranlagen unterschiedliche Abfälle an, welche einer geordneten schadlosen Entsorgung zuzuführen sind. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem erzeugten Klärschlamm, dem Rechengut und der Sandfanginhalte. Einmal jährlich werden die Betreiber der kommunalen Kläranlagen dazu aufgefordert, die ausgewerteten Eigenkontrolldaten in einem Bericht an die zuständige Wasserbehörde weiterzuleiten. Die Daten der angefallenen Abfallmengen und deren Verbleib sind in diesem Bericht enthalten. Mithilfe des Fachinformationssystems „Hessische Abwasseranlagen“ (HAA) werden die Berichtsdaten erfasst und ausgewertet. Tabelle 15 veranschaulicht die Daten für das Berichtsjahr 2012: (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013)

Tabelle 15 - Aufkommen und Entsorgung von Abfällen aus kommunalen Kläranlagen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013)

Entsorgungsweg	Art der Abfälle					
	Klärschlamm		Rechengut		Sandfanginhalte	
	Tonnen (TS)	%	Tonnen (TS)	%	Tonnen (TS)	%
Verbrennung	77.106	51	9.878	60	598	5
Landwirtschaft	54.598	36	-	-	-	-
Landschaftsbau/Rekultivierung	19.989	13	6.489	40	12.605	95
Insgesamt	151.693	100	16.367	100	13.203	100
Vergleichszahlen 2011	154.872		15.027		13.408	

Insgesamt sind in 2012 rd. 152.000 t Klärschlamm (TS) angefallen. Der Phosphatgehalt im Klärschlamm beträgt ca. 5 % (Schaum, et al., 2012). Daraus folgt ein theoretisches P-Potential von ca. 7.600 t P_2O_5/a .

Seit dem 01.06.2005 ist auf Grund der Abfallablagereverordnung (AbfAbIV), die am 27.04.2009 in die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV) aufgenommen wurde, eine direkte Deponierung der Klärwerksabfälle (ohne Vorbehandlung) nicht mehr möglich (Bundesministerium

der Justiz und für Verbraucherschutz, 2009). Das anfallende Rechengut und die Sandfanginhalte dürfen nach der Bioabfallverordnung nicht auf landwirtschaftlich genutzte Böden verbracht werden. Diese Abfälle werden der Verbrennung zugeführt oder nach einer Vorbehandlung im Landschaftsbau oder bei der Rekultivierung von Flächen eingesetzt. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), 2013)

Der Großteil des Klärschlammes (51 %) geht in die Verbrennung. Da zukünftig ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm geplant ist, wird sich dieser Anteil weiter erhöhen, während der Anteil der Entsorgung in der Landwirtschaft oder im Landschaftsbau abnehmen wird.

6.2. Auswertung der Befragung der Kläranlagen

Befragt wurden insgesamt 177 Kläranlagen (≥ 10.000 EW). Die aufsummierten Einwohnerwerte ergeben dabei einen Wert von 9.050.243 EW. Der Rücklauf betrug mit 69 Fragebögen einen aufsummierten Einwohnerwert von 5.957.601 EW. Bezogen auf die Einwohnerwerte ergibt sich somit ein Rücklauf von 65,8 %. Bezogen auf den aufsummierten Einwohnerwert aller Kläranlagen in Hessen von 10.272.328 EW ergibt sich ein Rücklauf von 58 %.

Die Berechnung bezieht sich nicht auf die Anzahl der ausgewerteten Fragebögen, sondern auf die Summe der Einwohnerwerte. Allein der Anteil der Kläranlagen von 10.000 bis einschließlich 20.000 EW beträgt bereits 36 % von den insgesamt befragten Kläranlagenbetreibern. Aufgrund des technischen und betrieblichen Mehraufwands einer Phosphor-Rückgewinnung, ist bei diesen Kläranlagen nicht davon auszugehen, dass ein derartiger Verfahrensschritt durchgeführt wird. Folglich stellt der Bezug zu den Einwohnerwerten eine sinnvollere Methode dar, die eine stärkere Gewichtung auf Anlagen mit einer höheren Ausbaugröße vorsieht.

Folgende Ergebnisse beziehen sich nur auf die Kläranlagen, die an der Befragung teilgenommen haben:

6.2.1. Ergebnisse bezüglich der Betriebsweise

Alle Kläranlagen verfügen über eine mechanische und biologische Reinigungsstufe sowie einer Anlagentechnik zur chemischen Phosphatfällung. Eine Kläranlage verfügt zusätzlich über einen Tropfkörper. Die Schlammentwässerung erfolgt mithilfe von Zentrifugen, Dekantern, Kammerfilterpressen oder Siebbandpressen. Bei wenigen Anlagen wird auf eine Entwässerung verzichtet, da der Klärschlamm auf nahegelegenen landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht wird. Insgesamt kommen drei Entsorgungswege zum Einsatz: Verbrennung, landwirtschaftliche Verwertung und die Anwendung zur Rekultivierung von Böden im Garten- und Landschaftsbau.

Bei den Kläranlagen bis unter 40.000 EW beträgt die durchschnittliche Phosphor-Eliminationsleistung 87 %. Bei den Anlagen mit 40.000 EW bis unter 100.000 EW beträgt diese 90 % und bei Kläranlagen ab 100.000 EW ist eine durchschnittliche Eliminationsleistung von 94 % zu verzeichnen. Insgesamt liegen die einzelnen Durchschnittswerte in einem Bereich zwischen 66,7 % und 98,2 %. Die in die Vorfluter geleitete Gesamt-Jahresfracht an P aller befragten Kläranlagen im Jahr 2012 beläuft sich auf rd. 295 t P/a. Dies entspricht etwa 41 % der in die Vorfluter geleiteten P-Jahresfracht aller Kläranlagen in Hessen.

6.2.2. Ergebnisse zur Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase

Die bestehenden Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus dem Abwasser sind vielmehr dem Prinzip der Phosphor-Elimination zuzuordnen, da keine gesonderte Abtrennung des Phosphors erfolgt, sondern eine Einlagerung bzw. Speicherung im Klärschlamm. Bei allen befragten Kläranlagen findet entweder eine chemische Fällung oder eine Kombination aus chemischer Fällung und biologischer Phosphatelimination statt. Diese Verfahren haben sich seit Jahrzehnten bewährt und laufen bei nahezu allen Kläranlagen ohne größere Betriebsprobleme oder Störanfälligkeiten ab. Die häufigsten erwähnten Störungen sind:

- Ablagerungen in Behältern und Rohren
- Verstopfungen von Filtern, Ventilen und Pumpen
- Verschlechterung des Wirkungsgrads der Bio-P aufgrund der Temperatur, Kohlenstofffracht oder des pH-Werts

Bei über 85 % der Anlagen erfolgte die Installation der Einrichtungen zur chemischen Fällung bereits in den 1980er oder 1990er Jahren. Die durchschnittlichen Investitionskosten betragen dabei ca. 165.000 €. Bei Kläranlagen bis 40.000 EW ist jährlich mit durchschnittlich 25.000 € für die Betriebskosten der Fällung zu rechnen. Hierzu zählen die spezifischen Fällmittelkosten inklusive Lieferung sowie Wartungs- und Unterhaltungskosten. Bei Kläranlagen ab 40.000 EW reichen die Betriebskosten von 20.000 € bis über 800.000 €.

Als Fällmittel kommen Poly-Aluminium-Chloride, unterschiedliche Eisensalze, Natriumaluminat oder Kalkhydrat zum Einsatz. Knapp über die Hälfte der befragten Kläranlagen verwenden Eisensalze, etwa 20 % Poly-Aluminium-Chloride und ca. 20 % Natriumaluminat. Die Gesamtmenge an eingesetzten Fällmitteln und die damit verbundenen Betriebskosten sind aufgrund von unvollständigen Daten nicht exakt zu bestimmen. Die Spannweite liegt jedoch beim Fällmittel-Verbrauch zwischen 14 t/a bis über 3.700 t/a.

Die Betriebskosten der biologischen Phosphatelimination hingegen können als vernachlässigbar eingestuft werden, da diese unter anaeroben Bedingungen abläuft, was mit einem sehr geringen Betriebsaufwand verbunden ist.

6.2.3. Ergebnisse zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

Als Ergebnis der Befragung kann festgehalten werden, dass derzeit an keiner Kläranlage in Hessen ein Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung betrieben wird, weder aus Klärschlamm noch direkt aus dem Schlammwasser/Zentratwasser. Lediglich an der Kläranlage in Darmstadt ist eine Anlage zum Phostrip-Verfahren installiert, die aber aus verfahrenstechnischen Gründen nicht in Betrieb ist: Aufgrund der Bildung von Blähschlamm kam es bei der Rezirkulation von rückgelöstem Schlamm zu Problemen mit der Absetzbarkeit. (Johannes Pinnekamp, 2011)

Der Aufbau des Phostrip-Verfahrens besteht im Wesentlichen aus einem Vorstripper, dem Phostrip-Becken und einem Fällungsreaktor. Ein Teilstrom des Rücklaufschlammes wird zusammen mit vorgeklärtem Abwasser in den Vorstripper geleitet. Im Phostrip-Becken erfolgt aufgrund der anaeroben Bedingungen eine Rücklösung der in den Mikroorganismen gespeicherten Phosphatreserven. Der Schlamm sedimentiert, während der phosphatreiche Überlauf des Phostrip-Beckens in einen Fällungsreaktor geleitet wird. Mithilfe von Kalkmilch erhält man als Fällprodukt Calciumphosphat, das anschließend abgeschieden werden kann. (Johannes Pinnekamp, 2007)

In Hessen gibt es Defizite im Bereich Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Schlammwasser. Um die geplanten Vorgaben aus der Politik zukünftig einhalten zu können, sind mittelfristig erhebliche Anstrengungen erforderlich. Bei den Betreibern der größeren Kläranlagen gibt es Überlegungen zu diesem Thema, jedoch noch keine konkreten Pläne bezüglich der Art der Verfahren sowie der Zeitrahmen der Einführung.

6.3. Auswertung der Befragung der Klärschlammverbrennungsanlagen

In Hessen sind derzeit zwei Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Betrieb: Die Klärschlammverbrennungsanlage der Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG im Industriepark Höchst und die Schlamm-Entwässerungs- und Verbrennungsanlage (SEVA) in Sindlingen betrieben durch die Stadtentwässerung Frankfurt am Main.

Die SEVA Sindlingen behandelt ca. 40.000 t TS/a. Der Klärschlamm wird „nass“ angeliefert (TS-Gehalt ca. 2,6 %) und stammt aus den beiden eigenen Abwasserreinigungsanlagen Niederrad/Griesheim und Sindlingen. Nach der Entwässerung mithilfe einer Zentrifuge beträgt der TS-Gehalt 28,1 %. In 2012 betrug die erzeugte Menge an Klärschlammasche 6.640 t mit einem mittleren Phosphorgehalt von ca. 83 kg P/t TS. Daraus resultiert ein theoretisches Phosphor-Potential von rd. 550 t P. Bisher ist noch kein Verfahren zur P-Rückgewinnung in Planung, auch wird die Asche nicht zur P-Rückgewinnung an einen anderen Betrieb weitergegeben. Die Entsorgung der Asche wird durch einen mittels öffentlicher Ausschreibung ausgewählten Entsorgungsfachbetriebs durchgeführt. Daten zum genauen Entsorgungsweg sowie Mengenangaben sind nicht vorhanden.

Die Monoverbrennungsanlage der Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG behandelt jährlich ca. 200.000 t TS an Klärschlamm mit einem TS-Gehalt zwischen 25 und 30 %. Der Schlamm stammt zu 60 % aus industriellen und zu 40 % aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen. Eine Vorbehandlung vor der Verbrennung findet nicht statt. Im Mittel liegt der Phosphorgehalt in der Asche bei ca. 48 kg P/t TS. In 2012 wurden 34.221 t Asche erzeugt, wodurch sich ein theoretisches Phosphor-Potential von rd. 1.640 t P ergibt. Es findet keine Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche statt, noch ist eine in Planung. Jedoch wird die technologische Entwicklung auf diesem Gebiet verfolgt. Der Großteil der Asche (ca. 88 %) wird über Deponien entsorgt, der restliche Anteil geht in den Bergversatz.

Um einen Überblick zu bekommen, welche Verfahren das größte Potential für einen Betrieb im großtechnischen Maßstab besitzen, werden in den folgenden Kapiteln unterschiedliche Verfahren auf verschiedene Bewertungskriterien hin untersucht. Das Ergebnis soll eine Hilfestellung geben, welche Verfahren für bestimmte Gegebenheiten oder Anforderungen am besten geeignet ist.

7. Auswahl der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren und Bewertungssystem

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus den Stoffströmen von Kläranlagen (Schlammwasser, Faul- und Klärschlamm, Klärschlammasche) entwickelt und erprobt. So unterschiedlich diese Stoffströme hinsichtlich ihrer Phosphorkonzentration, ihrem Volumen und der Charakteristik sind, so unterschiedlich gestalten sich die Verfahrensansätze. Das gemeinsame Ziel dieser Technologien besteht in der Erreichung einer möglichst hohen Rückgewinnungsquote bei gleichzeitiger Herstellung eines Endprodukts, das eine hohe Pflanzenverfügbarkeit mit geringen Risiken für die Umwelt aufweist. Unzureichende Datengrundlagen und fehlende technische Beschreibungen erschwerten bislang den politischen Entscheidungsträgern genaue Vorgaben zum Phosphor-Recycling zu entwerfen. Es ist nicht direkt ersichtlich, mit welcher Leistungsfähigkeit bezüglich der P-Rückgewinnung, Schadstoffentfrachtung und -zerstörung bei den einzelnen Verfahren zu rechnen ist. Auch welche entsorgungspflichtigen Reststoffe anfallen und welche Eigenschaften (z.B. Düngewirksamkeit, Schadstoffgehalte) und Herstellungskosten das Endprodukt aufweist, ist nicht immer eindeutig zu klären. Diese Arbeit soll eine Hilfestellung geben, anhand von Ergebnissen unterschiedlicher Forschungsprojekte, Studien oder Fachartikel, eine Auswahl der am „besten geeigneten“ Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium zu treffen. (Egle, et al., 2014)

7.1. Einsatzstellen zur Phosphor-Rückgewinnung in kommunalen Kläranlagen

Auf kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen können sieben Einsatzstellen für eine Phosphor-Rückgewinnung in Betracht gezogen werden (siehe Abbildung 12):

- 1) Kläranlagenablauf
- 2) Schlammwasser
- 3) Gelöster Anteil des Faulschlammes im Faulbehälter
- 4) Nicht eingedickter Faulschlamm
- 5) Eingedickter Faulschlamm
- 6) Entwässerter Klärschlamm
- 7) Klärschlammasche

7. Auswahl der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren und Bewertungssystem

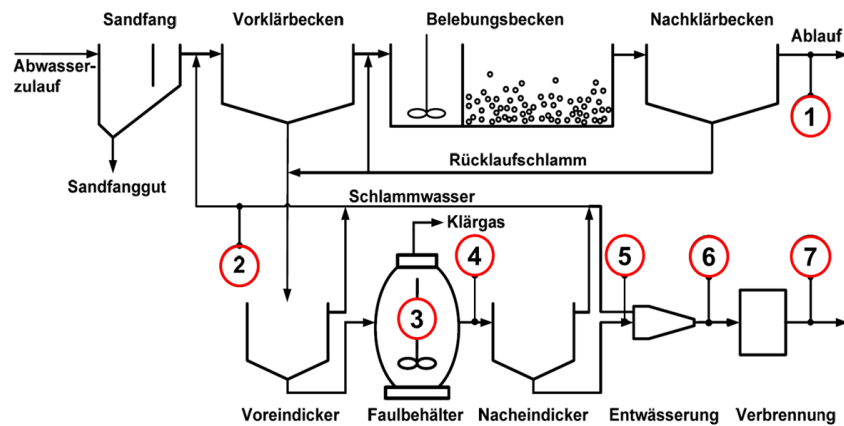


Abbildung 12 - Einsatzstellen zur P-Rückgewinnung in kommunalen Kläranlagen (Egle, et al., 2014)

Folgende Tabelle zeigt den durchschnittlichen Massenfluss und die durchschnittliche P-Konzentration bezogen auf den jeweiligen Stoffstrom. Die aufgezeigten Werte wurden nach (Egle, et al., 2014) bestimmt, weswegen die Werte in anderen Forschungsarbeiten variieren können.

Tabelle 16 - Vergleich der möglichen Einsatzorte bezüglich Massenfluss und P-Konzentration (Egle, et al., 2014)

	Stoffstrom	Massenfluss	P-Konzentration	P-Vorkommen
1	Kläranlagenablauf	200 l/(EW*d)	< 5 mg/l	gelöst
2	Schlammwasser	1 – 10 l/(EW*d)	10 – 300 mg/l	gelöst
3	Klärschlamm Faulbehälter (3,6 % TS)	1,6 kg/(EW*d)	1,4 g/kg FS	gelöst/biologisch und chemisch gebunden
4	nicht eingedickter Klärschlamm (3,6 % TS)	1,6 kg/(EW*d)	1,4 g/kg FS	gelöst/biologisch und chemisch gebunden
5	eingedickter Klärschlamm (10 % TS)	0,6 kg/(EW*d)	4 g/kg FS	biologisch und chemisch gebunden
6	entwässerter Klärschlamm (30 % TS)	0,2 kg/(EW*d)	12 g/kg FS	biologisch und chemisch gebunden
7	Klärschlammmasche	0,03 kg/(EW*d)	60 – 100 g/kg TS	chemisch gebunden

Zu 1): Im Kläranlagenablauf ist eine Rückgewinnung nur sinnvoll, wenn im Verlauf der Abwasserreinigung keine gezielte Phosphorelimination erfolgt. Bei Anwendung eines Rückgewinnungsverfahrens sind große Volumenströme von 200 l/(E*d) zu behandeln. Die P-Konzentrationen liegen dabei unter 5 mg/l.

Zu 2): Die Rückgewinnung aus Schlammwasser erfolgt im Nebenstrom, weswegen deutlich geringere Volumenströme behandelt werden müssen. Die P-Konzentrationen können dabei stark variieren und hängen von der Art der P-Elimination im Hauptstrom und von Rücklöseprozessen in der Schlammlinie ab. Generell ist bei der Anwendung einer Bio-P und anaerober Behandlung des Klärschlammes mit einhergehender P-Rücklösung mit hohen P-Konzentrationen im Schlammwasser zu rechnen (10 – 300 mg P/l). Dabei liegt der Phosphor in Form von Orthophosphat (PO₄-P) vor und ist vollständig gelöst.

Zu 3) – 6): Im Klärschlamm liegt Phosphor rein biologisch oder biologisch und chemisch-physikalisch gebunden vor. Somit ist eine gezielte Rücklösung aus der Schlammmatrix notwendig, bevor Phosphor zurückgewonnen werden kann. Zudem befinden sich Schwermetalle und organische Verunreinigungen im Faulschlamm, die sich zu einem möglichst geringen Teil im Endprodukt befinden sollten. Die Pflanzenverfügbarkeit des im Klärschlamm gebundenen P hängt im Wesentlichen von der Schlammbehandlung (aerob oder anaerob) und der Art der P-Elimination (chemisch oder biologisch) ab. Die P-Konzentration variiert je nach TS-Gehalt des Klärschlammes zwischen 1,4 g P/kg FS und 12 g P/kg FS. (Egle, et al., 2014)

Zu 7): Die P-Konzentration in der Klärschlammmasche ist abhängig von der P-Konzentration im Klärschlamm und liegt zwischen 60 – 100 g P/kg TS (Egle, et al., 2014). Infolge einer thermischen Behandlung findet eine nahezu vollständige Oxidation der im Klärschlamm vorliegenden organischen Verunreinigungen statt. Hinsichtlich der Schwermetalle ist von einer annähernd gleichen Anreicherung auszugehen wie für Phosphor. Lediglich der Gehalt an Quecksilber ist geringer, da es aufgrund seines niedrigen Siedepunkts größtenteils verdampft. (Lederer, et al., 2010) (Van de Velden, et al., 2008)

Als dominierende phosphorhaltige Mineralphase ist Whitlockit ($\text{Ca}_9(\text{Mg,Fe}^{2+})(\text{PO}_3(\text{OH})(\text{PO}_4)_6)$) in den Ascherückständen der Verbrennung nachweisbar (Maier, et al., 2007). Daneben sind vereinzelt auch Verbindungen wie Apatite ($\text{Ca}_5(\text{F,Cl,OH})(\text{PO}_4)_3$) und Stanfieldit ($\text{Ca}_4(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Mn})_5(\text{PO}_4)_6$) nachweisbar (Gajic, 2011). Diese Verbindungen weisen eine sehr geringe bis keine Wasserlöslichkeit auf und sind damit auch nicht unmittelbar pflanzenverfügbar.

Abwasser, Schlammwasser, Klärschlamm oder Klärschlammmasche unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und damit auch in der P-Rückgewinnungsquote. Grundsätzlich besitzt die P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche die größte mögliche Rückgewinnungsrate (siehe Tabelle 17). (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Tabelle 17 - Rückgewinnungspotentiale von Klärschlamm (LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012)

Ausgangsstoff	Rückgewinnungspotential (in % der Zulaufkraft)	Mögliche Rückgewinnungsrate (in % der Zulaufkraft)
Kläranlagenablauf	max. 55 %	50 %
Schlammwasser	max. 50 %	45 %
Entwässerter (Faul-)Schlamm	~90 %	60 %
Klärschlammmasche	~90 %	80 %

Das aktuell mögliche Rückgewinnungspotential von ca. 90 % aus Klärschlammmasche wird jedoch begleitet von einem höheren Betriebsaufwand. Abbildung 13 zeigt eine Vielzahl der derzeit bekannten Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Ab- und Prozesswasser, Klärschlamm und

Klärschlammasche. Ziel ist es, aus diesen Verfahren eine Auswahl der am besten geeigneten Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium zu treffen.

Ausgangsstoff Abwasser und Prozesswässer	Ausgangsstoff Klärschlamm	Ausgangsstoff Klärschlammasche
Kristallisations- und Fällungsverfahren Phostrip DHV Crystalactor® Ostara PEARL® Unitika Phosnix® Nishihara NuReBas NuReSys Kurita Festbettreaktor Ebara MAP Kristallisation Treviso CSIR Wirbelschichtreaktor REPHOS® P-RoC Sydney Waterboard Reaktor Ionentauschverfahren REM NUT® PHOSIEDI Kombinations- und Sonderverfahren RECYPHOS Magnetseparator	Kristallisationsverfahren AirPrex-MAP-Verfahren PECO-Verfahren (mikrobielle Oxid.) PRISA-Verfahren Adsorptionsverfahren FIX Phos Säureaufschluss Stuttgarter Verfahren Seaborn-Verfahren Gifhorner Verfahren Hydrothormaler Aufschluss/ Oxidation Cambi-Prozess (mit ...) Kemira KREPRO® LOPROX-Verfahren (mit Nanofiltration) Aqua-Reci Thermochemischer Aufschluss Mephrec ATZ-Eisenbadreaktor RecoPhos	Nasschemischer Aufschluss RÜPA-/PASCH-Verfahren (erweitertes) SEPHOS-Verfahren SESAL-PHOS BioCon LEACHPHOS Eberhard Verfahren Thermochemischer Aufschluss AshDec-Verfahren Mephrec ATZ-Eisenbadreaktor RecoPhos (thermo-chemische fraktionierte Extraktion) Elektrokinese EPHOS Bioleaching Inocre

Abbildung 13 - Bekannte Verfahren zur P-Rückgewinnung (Pinnekamp, 2013)

7.2. Bewertungskriterien

Die Bewertung der unterschiedlichen Verfahren zur P-Rückgewinnung erfolgt in dieser Arbeit anhand von fünf Bewertungskriterien, die als wesentlich erachtet werden und zu denen die zuverlässigste Datengrundlage vorliegt. Diese sind Verfahrensstruktur, Phosphor-Rückgewinnungspotential, Produkteigenschaften, Wirtschaftlichkeit und ökologische Bewertung.

7.2.1. Verfahrensstruktur

Das wichtigste Kriterium zur Bewertung der unterschiedlichen Verfahren ist die Verfahrensstruktur, d.h. der Grad der Umsetzung, die Komplexität der Betriebsweise, der Ressourcenaufwand und der Aufwand der Implementierung in bestehenden Anlagen. Der Umsetzungsgrad beschreibt, ob sich ein Verfahren noch im Labormaßstab, im halbtechnischen Maßstab oder bereits im großtechnischen Maßstab befindet. Generell sind großtechnisch umgesetzte Verfahren positiver zu bewerten, da eine fundierte Datengrundlage zu bestimmten Kriterien, wie z.B. P-Rückgewinnungspotential oder Wirtschaftlichkeit, vorhanden sind sowie Daten zu möglichen Betriebsproblemen und Verbesserungsmaßnahmen. Bei Verfahren, die sich noch im Labormaßstab befinden, ist mit noch unvorhersehbaren Schwierigkeiten bei der Übertragung in die Großtechnik zu rechnen. (Egle, et al., 2014)

Eine hohe Komplexität bzw. eine komplexere Betriebsweise ist im Normalfall mit höheren Kosten und häufigeren Betriebsstörungen verbunden, weswegen Methoden mit wenigen Verfahrensschritten und einer einfachen Betriebsweise vorzuziehen sind. Die Zuverlässigkeit und Robustheit des Verfahrens spielt vor allem im Bereich Abwasser und Klärschlamm eine große Rolle, da diese keine einheitliche Zusammensetzung aufweisen und somit das Auftreten von Betriebsstörungen eine größere Wahrscheinlichkeit besitzt. Außerdem sind Verfahren mit geringem Energie- und Chemikalienaufwand positiver zu bewerten, da Ressourcenschonung in allen Bereichen anzustreben ist. (Pinnekamp, et al., 2011)

Ein weiterer Punkt stellt der Aufwand der Implementierung dar, d.h. welcher Aufwand für die Einführung eines Verfahrens in eine bestehende Kläranlage zu tätigen ist. Kann ein System, ohne zusätzliche bautechnische Maßnahmen, einfach in die bestehende Betriebsweise integriert werden, ist dies als positiv zu bewerten. Dieses Bewertungskriterium entfällt jedoch bei der Bewertung der P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche, da diese in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen Anwendung finden und keine detaillierten Daten hinsichtlich der Implementierung vorhanden sind.

7.2.2. Phosphor-Rückgewinnungspotential

Ein weiteres Bewertungskriterium ist das Phosphor-Rückgewinnungspotential, d.h. wie viel Prozent des Phosphors bezogen auf den Kläranlagenzulauf oder auf den Anlageninput zurückgewonnen werden kann. Hohe Wirkungsgrade an zurückgewonnenem Phosphat im Verhältnis zum Ausgangsstoff sind nicht bei allen Verfahren realisierbar. Außerdem ist i.d.R. ein hoher Rückgewinnungsgrad mit einem höheren Betriebsaufwand verbunden.

7.2.3. Produkteigenschaft (Pflanzenverfügbarkeit)

Ziel der Phosphor-Rückgewinnung aus dem Abwasser ist die Herstellung eines Produkts mit hoher Pflanzenverfügbarkeit, um es in der Landwirtschaft wirksam als Düngemittel einsetzen zu können. In Pflanzenversuchen sollte das Produkt ein mit herkömmlichen Kunstdüngern vergleichbares Resultat aufweisen. Gleichzeitig müssen die Richtlinien der Düngemittelverordnung hinsichtlich der Schwermetallgehalte sowie unerwünschter organischer Substanzen eingehalten werden. Bei einem zu hohen Gehalt an Eisen oder Aluminium im Produkt, ist aufgrund der starken Bindung von Phosphat an die Metallionen der Einsatz als Düngemittel weniger geeignet. Als Alternative ist der Einsatz in der chemischen Industrie möglich, wo andere P-haltige Substanzen, wie z.B. Reinigungsmittel, hergestellt werden. (Pinnekamp, et al., 2011)

Für eine bessere Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit werden die Produkte zudem auf ihre Wasserlöslichkeit und falls möglich auf ihre Löslichkeit im sauren und basischen Milieu untersucht. In der endgültigen Bewertung wird jedoch nur die Pflanzenverfügbarkeit der Endprodukte der jeweiligen Verfahren bewertet. Daten zu anderen Produkteigenschaften, wie Form (Pulver, Granulat) oder Löslichkeit, dienen vorrangig zu Vergleichszwecken.

7.2.4. Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit beruht vor allem auf den Investitions- und Betriebskosten der jeweiligen Verfahren. Daraus können Werte zu den produktspezifischen Kosten (€ pro kg sekundär erzeugtem Phosphat) und einwohnerspezifischen Kosten (€ pro Einwohner und Jahr) abgeleitet werden.

Zunächst wäre es vorteilhafter kostengünstigere Verfahren anzuwenden, um Erfahrungswerte zu erhalten. Mithilfe der Erfahrungen ist eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit möglich, wodurch das zurückgewonnene Phosphat schneller wettbewerbsfähig wird. Außerdem werden mit zunehmender Wirtschaftlichkeit neue Investoren auf die Verfahrensweise aufmerksam, die das Verfahren im großtechnischen Maßstab anwenden werden. (Pinnekamp, et al., 2011)

7.2.5. Ökologische Bewertung

Dieses Kriterium befasst sich vor allem mit den Schwermetallgehalten in den fertigen Endprodukten. Desto höher die Entfrachtungsleistung bezüglich der Schwermetalle ist, desto geringer ist die anschließende Belastung der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Außerdem ist die Betrachtung der anfallenden Rest-/Abfallstoffe von Bedeutung, deren fachgerechte Entsorgung sichergestellt werden muss.

Ein weiterer interessanter Punkt wäre die Eliminationsleistung der Verfahren hinsichtlich organischer Schadstoffe. Da diesbezüglich die Datengrundlage für eine ausführliche Bewertung nicht ausreichend ist, kann dieser Punkt nicht untersucht werden.

7.3. Auswahl der Verfahren und Bewertungssystem

Zu den drei Hauptbereichen der P-Rückgewinnung (flüssige Phase, Klärschlamm und Klärschlamm- asche) werden zuerst die wichtigsten Rückgewinnungsverfahren ausführlich beschrieben. Die ermittelten Daten basieren dabei auf den Ergebnissen verschiedener Forschungs-berichte, Artikel aus Fachzeitschriften und Daten der Betreiber. Da eine umfassende Bewertung aller existierenden Verfahren (siehe Abbildung 13) im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, werden speziell die

7. Auswahl der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren und Bewertungssystem

Verfahren gewählt, die über eine ausreichende Datengrundlage aufgrund von halb- oder großtechnischen Versuchen verfügen und deren zukünftiges Potential als hoch eingestuft wird. Anschließend werden die einzelnen Verfahren in jedem Bereich gegenübergestellt und verglichen, um die Vorteile und Defizite hervorzuheben. Der in 2014 veröffentlichte „Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ des Österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft befasste sich bereits ausführlich mit der Bewertung verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren. Da vereinzelt Daten zu den Bewertungskriterien (z.B. produktspezifische Kosten) für die jeweiligen Verfahren aus anderen Quellen nicht ermittelt werden konnten, dienen die Ergebnisse dieses Endberichts zum Vergleich bzw. zur Vervollständigung der abschließenden Bewertung.

Zusätzlich werden die Verfahren mithilfe eines Punktesystem vergleichend bewertet, um die am besten geeigneten Verfahren für das jeweilige Kriterium darzustellen. Es soll hervorheben, welches Verfahren bspw. die einfachste Betriebsweise oder die höchste P-Rückgewinnungsrate aufweist. Dabei können für jedes Kriterium maximal fünf Punkte erreicht werden, während die niedrigste Punktzahl eins ist. Sind bei einem Kriterium mehrere Unterkategorien vorhanden, so wird der Mittelwert gebildet. Die genaue Punktevergabe ist folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 18 - Bewertungssystem der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren

Punktzahl		1	2	3	4	5
Kriterium						
Verfahrensstruktur	Umsetzungsgrad	unbekannt	Labormaßstab	halbtechnisch	Pilotanlage	großtechnisch
	Komplexität	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering
	Ressourcenaufwand	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering
	Implementierung	sehr komplex	komplex	mäßig	einfach	sehr einfach
P-Rückgewinnungsrate	P-Rückgewinnungspotential	sehr schlecht	schlecht	mäßig	hoch	sehr hoch
Produkteigenschaft	Pflanzenverfügbarkeit	sehr schlecht	schlecht	mäßig	gut	sehr gut
Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering
	Betriebskosten	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering
	Produktspezifische Kosten	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering
Ökologische Auswirkungen	Schwermetallgehalt	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering
	Abfallstoffe	sehr hohe Menge	hohe Menge	mäßig	wenig	keine

Abschließend werden für jedes Verfahren die erreichten Punkte zu einer Gesamtpunktzahl aufsummiert und ein Endergebnis in Relation zur maximal möglichen Punktzahl 5 berechnet. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel 8.5. erläutert. Das Verfahren, das infolge dieser Berechnung, die höchste Punktzahl aufweist, ist für den jeweiligen Stoffstrom am besten geeignet.

8. Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase

Ein Vorteil der P-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase ist der geringe verfahrenstechnische Aufwand, da Phosphor bereits in gelöster Form vorliegt. Die Verfahren beschränken sich im Wesentlichen auf die Überführung (Fällung oder Kristallisation) der gelösten Phosphate in schwer lösliche Salze i.d.R. mithilfe von Erdalkalimetallen wie Mg^{2+} und Ca^{2+} . Als Produkte entstehen dabei Magnesium-Ammonium-Phosphate (MAP) und Calcium-Phosphate (CaP). Beeinflusst wird die Fällungsreaktion durch Faktoren wie Art und Konzentration der Ionen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-}), pH-Wert sowie Temperatur. Bei einer hohen Konzentration an PO_4 -P findet bereits im neutralen bzw. leicht basischen pH-Bereich (pH 7 - 8) eine Kristallisation und/oder Fällung statt. Bei geringeren PO_4 -P-Konzentrationen ist zuerst eine Einstellung des idealen pH-Werts erforderlich. Folglich wirkt sich eine hohe Konzentration an gelösten Phosphaten positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Betriebsweise aus. Um dies zu gewährleisten, ist eine überwiegend biologische P-Elimination erforderlich mit anschließenden Prozessen, die den biologisch gebundenen Phosphor wieder freisetzen (Egle, et al., 2014).

Neben den Fällungs- und Kristallisationsreaktionen ist eine P-Rückgewinnung über Ionenaustauschverfahren (REM NUT®) oder Adsorptionsverfahren (Recyphos) möglich. In Deutschland wird derzeit im Verbundprojekt „PHOSIEDI“ des BMBF an der P-Rückgewinnung über Ionenaustauscher mit zusätzlicher Elektrodialyse geforscht (Hermann, 2009). Diese Verfahrensansätze sind noch nicht ausgereift genug, um eine zuverlässige Bewertung durchzuführen. Daher liegt der Schwerpunkt im Bereich Abwasser und Prozesswasser in dieser Arbeit auf der Rückgewinnung durch Fällung und Kristallisation.

8.1. Grundlagen der Phosphat-Elimination aus der flüssigen Phase

Der Phosphor im Abwasser liegt zum größten Teil in anorganisch gebundener Form gelöst vor und besteht hauptsächlich aus Orthophosphat (PO_4^{3-}) und kondensierten Phosphaten aus Waschmitteln. Der restliche Teil des Gesamtphosphors liegt gelöst oder ungelöst in organisch gebundener Form vor. Organisch gebundener Phosphor (z.B. in Nukleinsäuren) und kondensierte Phosphate (z.B. $P_3O_{10}^{5-}$) werden fast vollständig im Kanalnetz und im Laufe der Abwasserbehandlung durch Hydrolyse zu Orthophosphat umgewandelt. Einige Phosphorverbindungen, wie nicht hydrolysierte Polyphosphate und organische Phosphorverbindungen, bilden mit den üblichen Fällungsmitteln keine schwerlöslichen Verbindungen. Diese Phosphate können nur durch Adsorption aus dem Abwasser entfernt werden. (Bever, et al., 2002)

In Hessen wurde noch kein Verfahren zur gezielten P-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase umgesetzt. Die bestehenden Verfahren beziehen sich ausschließlich auf die Elimination des Phosphors aus dem Abwasserstrom durch chemisch-physikalische Fällung und/oder biologische P-Elimination. Daher werden in den beiden folgenden Abschnitten diese Prozesse genauer beschrieben.

8.1.1. Chemisch-physikalische Phosphatfällung

Bei der Fällung handelt es sich um einen sogenannten Phasenübergangsprozess bei dem in Wasser gelöste, meist ionische Komponenten in eine ungelöste, partikuläre Form überführt werden. Zusätzlich werden in der Abwasserreinigung auch Flockungsverfahren angewandt, bei denen kleinere, ungelöste Feststoffe in größere Verbände überführt werden. Hierbei handelt es sich um keinen Phasenübergangsprozess. Größere Bedeutung findet das Flockungsverfahren beispielweise in der Verbesserung der Absetzwirkung im Vorklärbecken, während das Fällungsverfahren bei der Phosphorelimination eingesetzt wird. In der konventionellen Abwassereinigung werden meistens beide Prozesse kombiniert, um eine bessere Abtrennung des durch Phosphate gebildeten, gelartigen Niederschlags zu erreichen. (Bever, et al., 2002)

Das Fällungsverfahren zur Umwandlung gelöster Phosphate in ungelöste Metallphosphatverbindungen kann folgendermaßen beschrieben werden: Je nach Art der Fällung (Vor- und Simultanfällung, Nachfällung, Flockungsfiltration) werden bestimmte Metallsalze (z.B. Aluminiumsulfat, Eisen(III)-chlorid) an einer bestimmten Stelle der Kläranlage in gelöster Form zugegeben. Dadurch entstehen ungelöste Metallphosphate und je nach pH-Wert ungelöste Hydroxide. Diese Fällprodukte können anschließend mithilfe eines der herkömmlichen Verfahren zur Flüssig/Fest-Trennung, wie beispielsweise durch Flotation, Sedimentation oder Filtration, aus dem Abwasser entfernt werden. (Bever, et al., 2002)

Folgend sind die wesentlichen Fällungsmechanismen aufgeführt:

Aluminium- und Eisenionen:



Das Verhalten von Fe^{3+} und Al^{3+} bezüglich ihrer Eigenschaften als Fällmittel ist sehr ähnlich. Die Flockenbildung sowie die Löslichkeit der Metallphosphate sind pH-abhängig. FePO_4 hat die geringste Löslichkeit im pH-Bereich 5,0 - 5,5, AlPO_4 bei pH 6,0 - 7,0. Beide Metallphosphate können im meist

eingestellten pH-Bereich zwischen 6,5 und 8,5 mit hoher Ausbeute ausgefällt werden. (Bever, et al., 2002)

Kalkhydrat:

Neben Metallionen, wird auch Kalkhydrat eingesetzt. Folgende Gleichung gibt die Fällungsreaktion mit Kalkhydrat im basischen Milieu an:



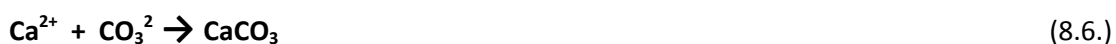
Mit steigendem pH-Wert sinkt die Löslichkeit der Calciumphosphatverbindung. Für die Bildung von unlöslichem Calciumphosphat ist die Erhöhung des pH-Wertes durch OH^- -Ionen des Kalkhydrats ausschlaggebend. (Bever, et al., 2002)

Konkurrierende Mechanismen:

Neben der gewünschten Fällung des Phosphats treten auch konkurrierende Reaktionen auf. Zu diesen Reaktionen gehören die Hydroxidbildung, die Carbonatbildung, die Komplexbildung mit organischen Stoffen und die Adsorptionsreaktionen. Technisch gesehen führen diese konkurrierenden Mechanismen zu einem Mehrverbrauch an Fällungs- und Flockungsmitteln und folglich zu einem gestiegenen Schlammaufkommen. Bei der Fällung mit Eisen- oder Aluminiumionen ist die wesentliche konkurrierende Reaktion die Fällung zu Hydroxiden: (Bever, et al., 2002)



Bei der Fällung mit Calciumionen kommt es im Bereich von pH 8,5 bis 10,5 zur Bildung von Calcit (Calciumcarbonat), wodurch Krustenbildung in Becken und Rinnen entstehen kann.



8.1.2. Die biologische Phosphat-Elimination

Mikroorganismen betreiben nicht nur die normale, wachstumsbedingte Phosphorassimilation, sondern sind auch in der Lage eine größere Menge an Phosphor aufzunehmen, als für ihr Wachstum und ihre Vermehrung benötigt wird und speichern diesen in Form von Polyphosphat. Die Polyphosphatspeicherung ist von verschiedenen Umweltfaktoren abhängig, beispielsweise von der Phosphat- und Substratkonzentration des Mediums und dem Gehalt an verschiedenen Metallionen. In normal belasteten Belebungsanlagen kann durch das biologische Phosphor-Eliminierungsverfahren bis zu 30 % des Phosphors aus dem Abwasser im belebten Schlamm gebunden werden. Unter

optimal eingestellten Betriebsbedingungen ist eine biologische Phosphorelimination bzw. eine Phosphoraufnahme von 70 bis 90 % erreichbar.

Ablauf der biologischen P-Elimination:

Für eine erfolgreiche biologische Phosphatentfernung aus dem Abwasser müssen in der anaeroben Zone zwei Bakteriengruppen zusammenwirken. Zuerst vergären fakultativ anaerobe Bakterien leicht abbaubare Polymere zu organischen Säuren, z. B. Essigsäure. Die aeroben Acinetobacter-Arten nutzen anschließend diese organischen Säuren als Substrat, um daraus unter Energieverbrauch Reservestoffe, wie beispielsweise Poly- β -hydroxybuttersäure (PHB), aufzubauen. Die Energie, die die Bakterien dafür benötigen, gewinnen sie durch den Abbau der energiereichen Polyphosphatverbindungen. Dadurch werden Phosphatmoleküle abgespalten und freigesetzt, somit erfolgt eine Rücklösung von Phosphat ins Abwasser. Je größer die Menge an rückgelösten Phosphat ist, desto höher ist die Aktivität dieses Stoffwechselprozesses. Demnach ist die Voraussetzung für eine optimale biologische P-Elimination, dass die Bakterien im anaeroben Bereich organische Säuren produzieren und möglichst viel Phosphat rückgelöst wird. Es ist darauf zu achten, dass während dieses Prozesses kein Nitrat anwesend ist. Nitrat hemmt nicht nur den Gärungsprozess, sondern wird auch von den nitratabbauenden Bakterien (Denitrifikanten) genutzt, um die zuvor gebildeten organischen Säuren zu verwerten. Somit würden den phosphatspeichernden Bakterien bei Anwesenheit von Nitrat weniger Nährstoffe zur Verfügung stehen, da sie mit den Denitrifikanten in Konkurrenz um das Substrat stehen. (Bever, et al., 2002)

Die Zeitspanne der anaeroben Phase beträgt eine oder mehrere Stunden. Aufgrund dieser kurzen anaeroben Behandlung des Belebtschlammes und des kontinuierlichen Wechsels zwischen den aeroben und anaeroben Verhältnissen können sich keine obligaten Anaerobier im Schlamm ansiedeln, weswegen kein Methan entsteht. (Bever, et al., 2002)

Die phosphatspeichernden Bakterien sind in der Lage mithilfe des Phosphatspeichers auch im anaeroben Milieu zu wachsen und Reservestoffe zu bilden. Dadurch ergibt sich ein Wachstumsvorteil gegenüber anderen aeroben Bakterien, sodass eine Anreicherung der phosphatspeichernden Bakterien in der Belebtschlamm-Biozönose möglich ist.

In der aeroben Zone bauen die Acinetobacter-Arten umgehend unter Einsatz der gespeicherten Reservestoffe (PHB) und externer Substrate den Polyphosphatspeicher wieder auf. Die Aufnahme des Phosphats in die Zellen ist dabei direkt abhängig von der vorhergehenden Rücklösung. Hierbei ist zu betonen, dass die Bakterien mehr Phosphat aufnehmen, als diese zuvor abgegeben bzw. rückgelöst haben (siehe Abbildung 14). (K. Mudrak, 2010)

8. Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase

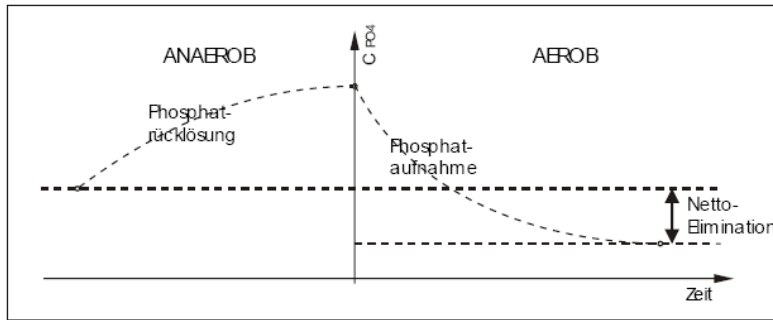


Abbildung 14 –Biologische P-Elimination (Barjenbruch, et al., 2009)

Folgende Regeln müssen bei der biologischen P-Elimination eingehalten werden: (K. Mudrak, 2010)

- Es muss eine ausreichende Menge an leicht abbaubaren Substraten vorhanden sein, um die Bildung von organischen Säuren sicherzustellen.
- Die Zufuhr von Nitrat muss minimiert werden.
- Die Schlammverweilzeit im Nachklärbecken muss so niedrig eingestellt werden, dass keine Phosphatrücklösung eintreten kann.

8.2. Effizienz und Phosphor-Rückgewinnungspotential

Grundsätzlich ist keine 100 prozentige Rückgewinnung möglich, da sich in der Praxis fast ausschließlich ein gelöster inerte Anteil der Phosphate (z.B. Phosphonate) oder nicht gefälltes, gelöstes Orthophosphat im Abwasser befinden. Jedoch ist dieser Anteil sehr gering und nur dann von Bedeutung, wenn über gewerbliche oder industrielle Einleitungen größere Mengen dieser Phosphate ins Abwasser gelangen. (Marc Böhler, 2008)

Insgesamt ist bei gleicher Bemessungsgrundlage die Effizienz der Fällmittel bei hohen Phosphatkonzentrationen besser, da durchgehend eine gewisse Menge des Fällmittels nicht mit dem Phosphat reagiert. Dadurch reduziert sich die Effizienz bezogen auf die eliminierte Masse an Phosphat.

Außerdem hat das angestrebte Qualitätsziel einen starken Einfluss auf die Effizienz. Die spezifisch notwendigen Fällmittelmengen steigen exponentiell, je höher das Qualitätsziel angesetzt ist. Auch der Ort und die Art der Dosierung beeinflusst die Effizienz der Phosphoreliminierung. Häufig erfolgt eine Simultanfällung in den Rücklaufschlamm. Das Ziel hierbei ist, durch eine „Kreislaufrführung“ des gebildeten Fällschlammes, einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, indem sich weitere feine Partikel und Feststoffe an die bereits gebildeten Flocken der Fällprodukte adsorbieren. (Marc Böhler, 2008)

8. Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase

Bei einer durchschnittlichen P-Zulaufmenge von $1,8 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$ liegt nach (Petzet, et al., 2010) das Potential für eine Phosphor-Rückgewinnung aus dem Kläranlagenablauf zwischen 33 und 50 % bzw. zwischen $0,2$ und $0,5 \text{ g P}/(\text{E} \cdot \text{d})$ (siehe Abbildung 15). Nach eigenen Berechnungen liegt die Menge an P, die pro Einwohner und Tag aus der wässrigen Phase gewonnen werden kann, etwas höher. Bezieht man die 33 – 50 % auf die eliminierbare Menge von $1,6 \text{ g P}/(\text{E} \cdot \text{d})$ (Zulauf abzüglich Ablauf), so beträgt das Potential der rückgewinnbaren Menge $0,5 – 0,8 \text{ g P}/(\text{E} \cdot \text{d})$. Bezogen auf die Bevölkerungszahl in Hessen (6.016.000 Einwohner) ergibt sich daraus ein theoretisches P-Potential von $3,0 – 4,8 \text{ t P}/\text{d}$ bzw. $1.100 – 1.750 \text{ t P}/\text{a}$.

Verfahren, die sich auf die P-Rückgewinnung aus dem Kläranlagenablauf konzentrieren, sind nur bei Kläranlagen ohne Verwendung einer chemisch-physikalischen Fällung oder Bio-P erreichbar, da ansonsten der Großteil des Phosphats im Klärschlamm gebunden ist.

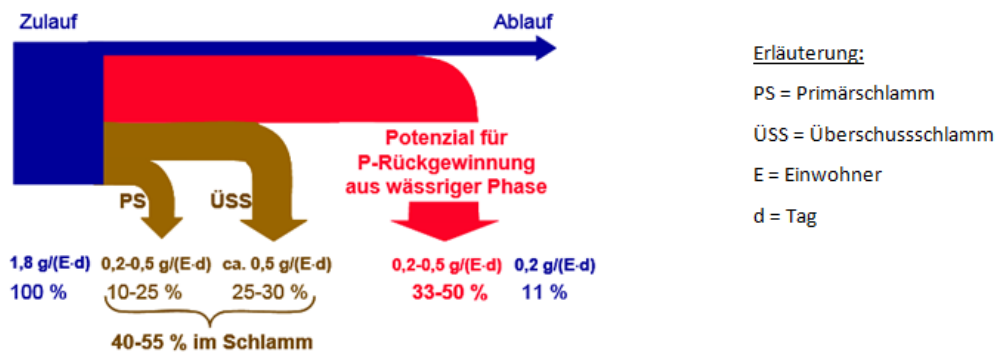


Abbildung 15 - P-Rückgewinnungspotential aus der wässrigen Phase für Kläranlagen ohne Fällung und Bio-P (Petzet, et al., 2010)

Bei Verfahren zur Rückgewinnung aus dem Schlammwasser hingegen ist eine größtmögliche P-Elimination (Bio-P und/oder Simultanfällung) Voraussetzung, um die Einbindung des Phosphats in den Klärschlamm (bis zu 90 % der zugeführten P-Fracht) zu gewährleisten. Die Zielsetzung hier ist eine maximale Rücklösung des Phosphats während der Schlammbehandlung, die zu hohen P-Gehalten im Schlammwasser und folglich zu hohen Rückgewinnungsrate führen (siehe Abbildung 16).

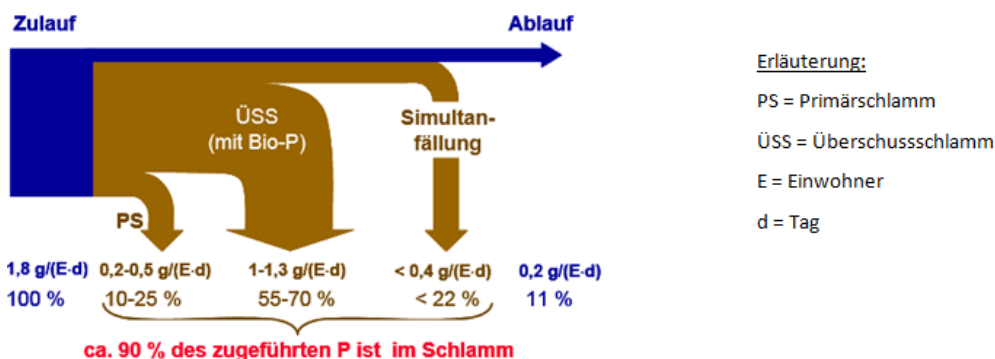


Abbildung 16 - P-Rückgewinnungspotential aus Schlammwasser für Kläranlagen mit Fällung und Bio-P (Petzet, et al., 2010)

8.3. Beschreibung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase

8.3.1. Ostara PEARL®

Die kanadische Firma Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc. entwickelte das Verfahren „Pearl® Nutrient Recovery Process“. Es basiert auf der Rückgewinnung von Phosphor aus Schlammwasser mithilfe eines Wirbelschichtreaktors. In 2007 erfolgte die Inbetriebnahme des ersten großtechnischen Reaktors in Edmonton, Kanada. Um eine möglichst hohe Rückgewinnungsrate zu erzielen, ist eine vermehrte biologische P-Elimination notwendig, um hohe Phosphorkonzentrationen im Schlammwasser zu garantieren. (Gethke-Albinus, 2012)

Im Reaktor wird am Boden Schlammwasser, Magnesiumchloridlösung und ggf. Natronlauge (zur pH-Wert Einstellung) zugeführt. Während der Reaktor von unten nach oben durchströmt wird, finden Fällungsreaktionen statt, bei denen sich MAP-Kristalle bilden. Die Querschnittserweiterung und folglich Strömungsverlangsamung der Kristalle lässt diese in Richtung Reaktorboden sinken, wo sie als Aufwuchsmaterial für weitere MAP-Kristalle dienen. Die Kristalle wachsen bis zu einer gewünschten Größe von 1 bis 3,5 mm, bevor sie aufgrund ihres Gewichts auf den Reaktorboden sinken und abgezogen werden. Nach einer Siebung und Lufttrocknung gelangt das Produkt in eine Absackanlage. Das Schlammwasser wird hingegen im Wirbelschichtreaktor nach oben befördert, wo es über Leitungen wieder zurück zum Kläranlagenzulauf gelangt. (Gethke-Albinus, 2012) (Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.)

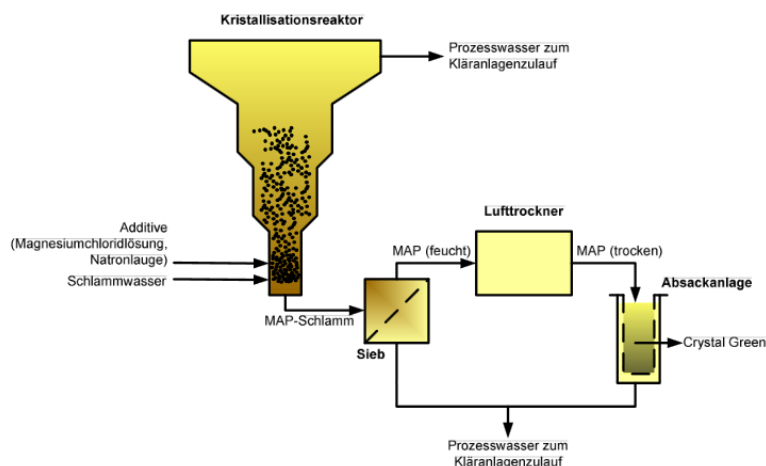


Abbildung 17 - Schematische Darstellung des PEARL® Nutrient Recovery Process (Gethke-Albinus, 2012)

Das hergestellte MAP wird direkt als Granulat aus dem Reaktor gewonnen, was für eine landwirtschaftliche Verwertung eine optimale Ausgangslage darstellt. Auf dem Markt ist das Produkt unter dem Namen Crystal Green® erhältlich. Laut den Herstellern weist das Produkt sehr geringe

Schadstoffgehalte auf, die unter den Gehalten in handelsüblichen Düngemitteln liegen. Zudem sind darin keine organischen Schadstoffe und pathogene Keime enthalten. (Gethke-Albinus, 2012)

Die Investitionskosten liegen je nach Ausbaugröße der Anlage bei zwei bis vier Millionen Euro. Laut Ostara können die Betriebskosten durch den Verkauf des Produkts gedeckt werden (Gethke-Albinus, 2012). Genauere Angaben seitens der Hersteller zu den Investitions- und Betriebskosten konnten nicht ermittelt werden.

Das Standard-Verfahren Pearl 2000 bezieht sich auf Kläranlagen mit einem Abwasserzufluss von 450 l/s bis 1.150 l/s. Laut den Angaben des Herstellers ist dabei eine Rückgewinnung von 250 kg Phosphat und 110 kg Ammonium pro Tag möglich. Insgesamt können 2.000 kg an Düngemittel (MAP) pro Tag hergestellt werden. (Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.)

Abschließend ist festzuhalten, dass das Ostara Pearl Verfahren neben der P-Rückgewinnung zur Verbesserung der Betriebsweise, wie z.B. Verminderungen der Inkrustationen durch Struvit-Ausfällung oder Reduzierung des Fällmitteleinsatzes, führt.

8.3.2. P-RoC

Das P-RoC-Verfahren (Phosphorous Recovery from wastewater by Crystallization) wurde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt, welches gelöstes Phosphat in der Abwasserphase über Kristallisation mithilfe von Calcium-Silicat-Hydrat (CSH) zurückgewinnt (Ehbrecht, et al., 2012). Das Verfahren eignet sich für die Behandlung von phosphatreichen Teilströmen kommunaler Kläranlagen sowie für industrielle und landwirtschaftliche Prozesswässer. Derzeit erfolgt die Erprobung des Verfahrens in einem Langzeitversuch im Pilotmaßstab (1 m³-Anlage), um die Wirtschaftlichkeit und Effizienz bestimmen zu können. (Ehbrecht, et al., 2014)

Das Verfahren basiert auf der Abscheidung von Calciumphosphaten auf der Oberfläche von Impfkristallen, z.B. CSH. Entscheidend für die Kristallisation ist die Anpassung des pH-Werts mithilfe von Natronlauge oder Kalkmilch, wodurch das Reaktionsgleichgewicht verschoben und eine Ausfällung von CaP ausgelöst wird. (Ehbrecht, et al., 2012) (Ehbrecht, et al., 2014)

Dieses einfache und effektive Prinzip liefert ein direkt als Düngemittel einsetzbares Endprodukt, das vollständig pflanzenverfügbar ist und zusätzlich mehrere Pflanzennährstoffe beinhaltet. (Rümmele, 2011)

Der P-Gehalt im Endprodukt kann bis zu 30 % erreichen, was vergleichbar mit dem P-Gehalt von Rohphosphat ist. Außerdem ist der Schwermetallgehalt sehr gering. (KIT - Karlsruher Institut für Technologie, 2013)

8. Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase

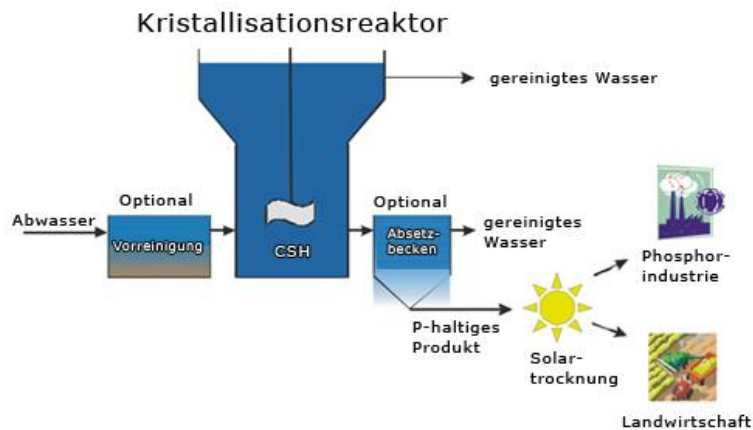


Abbildung 18 - Schematische Darstellung des P-RoC Verfahrens (KIT - Karlsruher Institut für Technologie, 2013)

Laut der Kostenabschätzung aus dem Verbundvorhaben „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland“ (PhoBe) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) liegen für das P-Roc Verfahren folgende Daten für eine Umsetzung auf einer Kläranlage mit einer Anschlussgröße von 100.000 EW vor: (Pinnekamp, et al., 2011)

Tabelle 19 - Kostenabschätzung P-RoC Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)

Prozesswassermenge	237.250 m ³ /a
P_{ges}-Fracht	0,2 g P/(E*d)
Rückgewinnungspotential	90 % (theoretisch)
Zurückgewonnene Menge P	6.570 kg P/a
Investitionskosten	390.000 €
Kapitalkosten	33.000 €/a
Betriebskosten	48.000 €/a
Einwohnerspezifische Kosten	1,0 €/(E*a)
Produktspezifische Kosten (ohne Preissteigerungen)	12,5 €/kg P
Produktspezifische Kosten (mit Preissteigerungen)	15,0 €/kg P

Die produktspezifischen Kosten liegen schätzungsweise bei ca. 12,5 €/kg P. Allerdings wurde zum einen die P-Fracht mit 0,2 g P/(E*d) in der Kostenabschätzung sehr klein angesetzt (Pinnekamp, et al., 2011). Bei höheren P-Frachten würden die produktspezifischen Kosten proportional dazu sinken. Zum anderen wird mit einer P-Rückgewinnungsrate von 90 % gerechnet, was in der Realität nur sehr schwer möglich ist. Eine Verringerung der Rückgewinnungsrate führt dementsprechend wieder zu höheren produktspezifischen Kosten. Somit kann der Betrag von 12,5 €/kg P nur als grober Schätzwert angenommen werden.

8.3.3. DHV Crystalactor®

Das Crystalactor-Verfahren basiert auch auf einer Kristallisationsreaktion und wurde von der Royal HaskoningDHV (Niederlande) patentiert (Royal HaskoningDHV, 2014). In erster Linie diente das Verfahren zur Entkarbonisierung von Trink- und Prozesswasser. Bereits seit den siebziger Jahren wurden in den Niederlanden ca. 30 und im Ausland ca. 20 Crystalactoren für Industriebetriebe und Wasserwerke in Betrieb genommen (Hermann, 2009). Eine weitere Anwendung ist die gezielte Entfernung von Phosphat aus dem Abwasser von kommunalen Kläranlagen und aus Industrieabwasser. Das System kann dabei wie folgt beschrieben werden:

Der zylindrische Reaktor (Crystalactor) kann im Hauptstrom nach der Nachklärung, im Nebenstrom oder in einem geeigneten, feststofffreien Industrieabwasserstrom betrieben werden. Dabei durchströmt gereinigtes Abwasser den Reaktor mit einer Geschwindigkeit von 40 bis 100 m/h. Nach der Zugabe von Impfmateriale (z.B. CSH, Sand) und der Anpassung des pH-Werts mittels Kalkmilch und/oder Natronlauge, lagert sich Phosphat an die Sandkörner, die sich aufgrund der Fließgeschwindigkeit in der Schwebelage befinden. (Von Horn, et al., 2010)

Im Reaktor werden die Prozessbedingungen dabei so eingestellt, dass der zu entfernende Stoff (z.B. Phosphat) aus dem Wasser direkt in das Kristallgitter der Körner auskristallisiert. Dadurch entstehen relativ feine, fast wasserfreie Salzkörner. Verunreinigungen durch organische Substanzen, Schwebstoffe und anderen Ionen werden somit praktisch ausgeschlossen. Der Kristallisationsprozess wird vor allem durch das Wirbelbett mit einer sehr großen Kontaktfläche ($5.000 - 10.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) begünstigt. Dadurch sind ein schneller Prozessablauf mit hoher Leistung und eine Vermeidung von Verkrustungen sichergestellt. (Hermann, 2009)

Infolge der Kristallisation entstehen Körner, die aufgrund ihres Gewichts (Größe von 1 – 2 mm) zu Boden sinken und dort abgezogen werden. Diese sind direkt in der Landwirtschaft oder als Rohstoff in der Phosphatindustrie einsetzbar. (Von Horn, et al., 2010)

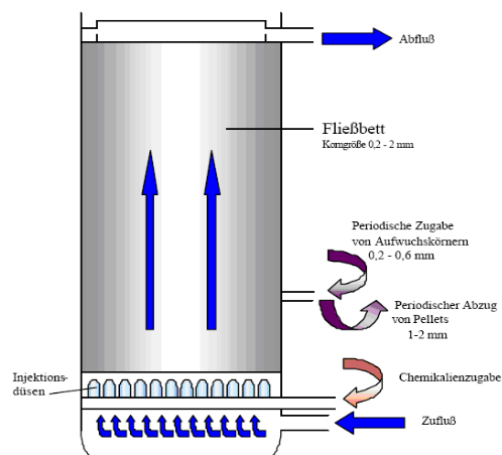


Abbildung 19 - Verfahrensschema DHV Crystalactor® (Von Horn, et al., 2010)

8. Phosphor-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase

Als Produkte können verschiedene Phosphor-Verbindungen, wie z.B. Calciumphosphate, Magnesiumphosphate, Kaliumphosphate oder Magnesium-Ammonium-Phosphate, erzeugt werden. (Adam, et al., 2010)

Genauere Angaben zu den Investitions- und Betriebskosten seitens der Hersteller konnten nicht ermittelt werden. Für die anschließende Bewertung werden die Daten nach (Egle, et al., 2014) verwendet.

8.3.4. PRISA

Das Verfahren basiert auf der Fällung von Phosphat (und Ammonium) in Form von MAP und wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen entwickelt. Für eine leichte Integration des Verfahrens in bestehende Kläranlagen sind eine vermehrte biologische P-Elimination im Hauptstrom sowie eine anaerobe Schlammstabilisierung von Nöten. (Montag, 2008)

Der Überschussschlamm der Kläranlage wird in einen Vordicker geleitet und bei einer Eindickzeit von mehreren Tagen mithilfe eines Rührwerks oder Umwälzleitung periodisch durchmischt. Durch die anaeroben Bedingungen erfolgt eine erhöhte biologische Phosphat-Rücklösung. Das rückgelöste Phosphat sammelt sich dabei im Überstandswasser an. Das Überstandswasser aus dem Voreindicker wird zusammen mit dem hoch ammoniumhaltigen (und phosphorhaltigen) Überstandswasser des Nacheindickers und dem Schlammwasser aus der Schlammentwässerung in einer Schlammwasservorlage gesammelt. Anschließend erfolgt die Abtrennung von Feststoffen mithilfe z.B. eines Tuchfilters. Das filtrierte Schlammwasser gelangt danach in einen Mischbehälter, indem Natronlauge zur Einstellung des pH-Werts und Magnesiumdioxid als Fällmittel zugegeben werden. Im Kristallisationsbehälter findet schließlich die Bildung der MAP-Kristalle statt, die vom Boden abgezogen werden können. (Montag, 2008)

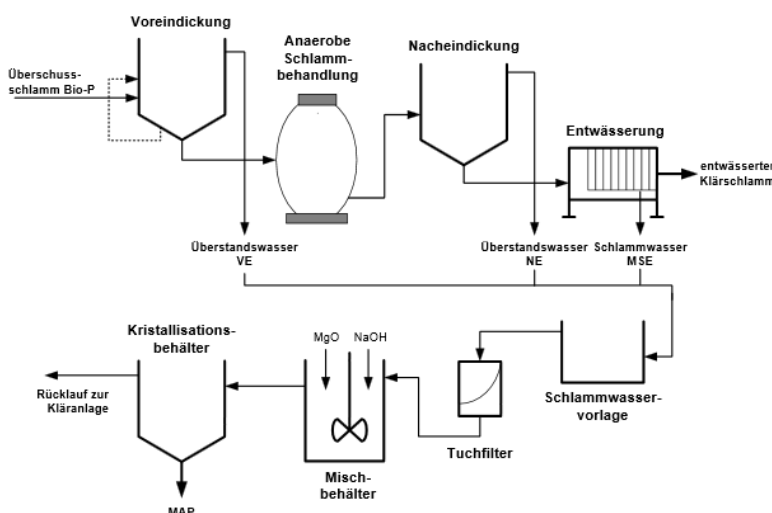


Abbildung 20 - Schematische Darstellung des PRISA-Verfahrens (Montag, 2008)

Bezüglich der im Endprodukt enthaltenen Schadstoffe können die Konzentrationen an relevanten Schwermetallen sowie an organischen Schadstoffen als gering eingestuft werden. Die derzeit gültigen Grenzwerte werden sicher eingehalten. Aus Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab ergeben sich für das PRISA Verfahren eine P-Rückgewinnungsrate von ca. 31 %, bezogen auf den Kläranlagenzulauf. (Montag, 2008)

Laut der Dissertation „Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen“ (Montag, 2008) kann folgende Kostenabschätzung für eine Umsetzung auf einer Kläranlage mit einer Anschlussgröße von 100.000 EW bei Integration vorhandener Anlagenteile getroffen werden: (Montag, 2008)

Tabelle 20 - Kostenabschätzung PRISA Verfahren (Montag, 2008)

P_{ges}-Fracht (Zulauf)	2,0 g P/(E*d)
P-Rückgewinnungsgrad	30 %
Zurückgewonnene Menge P	21.900 kg P/a
Investitionskosten	1.167.000 €
Kapitalkosten	96.000 €/a
Betriebskosten	73.000 €/a
Produktspezifische Kosten	7,72 €/kg P bzw. 0,97 €/kg MAP
Einwohnerspezifische Kosten	1,69 €/(E*a)

Bei der Anschaffung des Verfahrens mit Integration vorhandener Anlagenteile in den Prozess betragen die produktspezifischen Kosten 7,72 €/kg P bzw. 0,97 €/kg MAP. Bei einer kompletten Neuanschaffung des PRISA-Systems würden sich die Kosten um ca. 15 % erhöhen. Dadurch würden die produktspezifischen Kosten bei 8,92 €/kg P bzw. 1,12 €/kg MAP liegen. (Montag, 2008)

Da die Kostenabschätzung aus dem Jahr 2008 stammt, ist eine vergleichende Bewertung mit anderen Verfahren mit Unsicherheiten behaftet.

8.3.5. REM NUT[®]-Ionenaustauschverfahren

Das Verfahren wurde Mitte der 1980er Jahre in Italien entwickelt. Es basiert auf der Nährstoffrückgewinnung über einen Kationen- und Anionenaustauscher aus Abwässern aus dem Ablauf der biologischen Stufe, in der keine gezielte Phosphorelimination stattfindet (Montag, 2008).

Ammoniumionen werden hierbei im Kationentauscher mithilfe von natürlichen Zeolithen zurückgehalten. Anschließend können Phosphationen durch stark basische Austauschharze zurückgewonnen werden. Für die Regeneration der Ionentauscher wird Natriumchloridlösung benutzt. Der Prozess ist zweistufig aufgebaut, um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten (Brett, et al., 1997), (Liberti, et al., 12. - 13. März 2001). Das anfallende nährstoffhaltige Spülwasser wird einer MAP-Kristallisationsstufe zugeführt, in der Magnesiumchlorid zugegeben wird. Für die Anpassung des

pH-Werts zur Bildung der MAP-Kristalle wird Natronlauge verwendet. In das Produkt kann über 90 % Ammonium und über 95 % Phosphat aus der flüssigen Phase eingebunden werden. (Brett, et al., 1997)

Problematisch bei dem Verfahren ist die Rückhaltung von organischen Reststoffen in den einzelnen Prozessstufen. Dadurch treten Foulingprozesse auf, die einen vollständigen Austausch des Trägermaterials in den Ionentauschern zur Folge haben können. (Brett, et al., 1997)

Das REM NUT® Verfahren wurde auf verschiedenen Kläranlagen in einer mobilen Pilotanlage über längere Zeiträume getestet. Das Verfahren fand jedoch keine weitere Verbreitung und keine anderen europäischen Forschungsinstitutionen, die diese Idee weiter entwickeln wollten. In mehreren Ländern werden intensive Forschungen an selektiven Ionentauschern betrieben, weswegen dieser Verfahrensansatz vielleicht noch Zukunftspotential besitzt. (Hermann, 2009)

Eine Kostenabschätzung und genauere Angaben zu der Betriebsweise und den Eigenschaften des Endprodukts seitens der Hersteller konnten nicht ermittelt werden. In der anschließenden Bewertung werden fehlende Daten durch die ermittelten Werte nach (Egle, et al., 2014) ergänzt.

8.3.6. Nicht bewertete Verfahren (PHOSIEDI und RECYPHOS)

PHOSIEDI

Das PHOSIEDI-Projekt des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) beschäftigt sich mit der P-Rückgewinnung aus dem Filtrat aus der Klärschlamm-entwässerung mithilfe von Ionentauschern und Elektrodialyse. Der erste Verfahrensschritt beinhaltet dabei die Separation des Phosphats mittels Ionenaustausch. Der zweite Verfahrensschritt ist die Elektrodeionisation, bei der Phosphat zurückgewonnen wird und eine elektrochemische Regeneration des Ionentauschers stattfindet. Aus den Ergebnissen der Demonstrationsanlage können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden (Hoffmann, et al., 2014):

- Erfolgreiche Realisierung der Rückgewinnung von Phosphor in Form von Phosphorsäure
- Der Betrieb verläuft ohne Chemikalieneinsatz
- Hohe Wiederverwendbarkeit des Ionenaustauschers
- Weiterentwicklung der Anwendung der Technologie auf z.B. P-Rückgewinnung aus Klärschlamm
- Halbtechnische Demonstrationsanlage derzeit in Erprobung/Optimierung

Konkrete Aussagen über die Potentiale des Einsatzes im großtechnischen Maßstab können derzeit für das PHOSIEDI-Verfahren noch nicht getroffen werden. Dazu sind weitere Maßnahmen der Forschung und Entwicklung notwendig.

RECYPHOS

Ein weiteres Verfahren bzw. Projekt, das sich derzeit noch in der Entwicklung befindet, ist das vom BMBF geförderte Verbundprojekt RECYPHOS (Recycling von Phosphor – Beitrag zur Nachhaltigkeit in der dezentralen Abwasserbehandlung). Es wurde speziell für Kleinkläranlagen entwickelt, um Phosphor zurückzugewinnen und zu einem marktfähigen Produkt zu verarbeiten (Hellmann, et al., 2011). Das Verfahren basiert auf der Adsorption des Phosphors aus biologisch gereinigtem Abwasser mithilfe eines geeigneten Adsorbens. Dieses sollte eine hohe Beladungskapazität aufweisen und häufig wiederverwendet werden können, um möglichst geringe Behandlungskosten zu gewährleisten. Außerdem sollte die Integration des entwickelten Moduls in bestehende Kleinkläranlagen mit einem geringen Aufwand verbunden sein. (Hellmann, et al., 2011)

Zu beiden Verfahren sind noch keine ausführlichen Forschungsergebnisse vorhanden, weswegen diese nicht in die anschließende Bewertung mit aufgenommen werden. Aufgrund der im Vergleich zu den anderen P-Rückgewinnungsverfahren unterschiedlichen Verfahrensweise, wurde eine kurze Beschreibung in dieser Arbeit vorgenommen. Wie groß das Zukunftspotential dieser Verfahren ist, wird sich in den nächsten Jahren zeigen.

8.4. Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase

Für einen betrieblich stabilen und in vielen Fällen wirtschaftlichen Ablauf der Phosphor-Rückgewinnung aus dem Schlammwasser sind $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentrationen von über 75 mg/l notwendig. Grundsätzlich stellt die $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration noch vor der Temperatur und dem pH-Wert den wichtigsten Parameter für eine erfolgreiche P-Rückgewinnung dar. Somit sind eine (nahezu) vollständige biologische P-Elimination sowie eine möglichst hohe P-Rücklösung während der Schlammbehandlung Voraussetzung, um hohe P-Konzentrationen im Schlammwasser zu gewährleisten. (Egle, et al., 2014)

Im Wesentlichen beschränken sich die Methoden zur Rückgewinnung des gelöst vorliegenden Phosphors als CaP oder MAP auf Fällungs- und Kristallisationsverfahren. Diese sind einfache, effiziente und großtechnisch erprobte Technologien mit einem geringen Ressourcenbedarf. In der

Regel wird ein geeignetes Fällmittel, eine Base zur pH-Wert Anpassung und elektrische Energie zur Prozesssteuerung (Rührwerke, Pumpen) benötigt. (Egle, et al., 2014)

Zu erwähnen sind neben der P-Rückgewinnung auch weitere Vorteile für den Kläranlagenbetrieb infolge der Implementierung der Verfahren. Der Fällmittelbedarf wird verringert, was zu einem geringeren Schlammanfall führt. Außerdem werden Inkrustationen in Rohrleitungen vermieden, die erhebliche Betriebsstörungen zur Folge haben. (Egle, et al., 2014)

In dieser Arbeit wird näher auf die Verfahren Crystalactor[®], Ostara PEARL[®], PRISA und P-RoC eingegangen, da diese aufgrund der Datengrundlage als die aktuell am besten erprobten Verfahren im Bereich Schlammwasser zu betrachten sind. Im Bereich Kläranlagenablauf wird aufgrund der vorhandenen Datengrundlage nur das REM NUT[®] Verfahren genauer untersucht. Im Verlauf der Bewertung wurde jedoch festgestellt, dass das Verfahren für einen großtechnischen Einsatz derzeit nicht geeignet ist. Die ausführliche Begründung befindet sich im Abschnitt 8.4.2. Zusammenfassung der Bewertung. Daher findet für das REM NUT[®] Verfahren keine vollständige Bewertung aller Kriterien statt. Es dient vorrangig als Vergleich zu den Fällungs- und Kristallisationsverfahren.

8.4.1. Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien

Verfahrensstruktur

Bezüglich der Ressourcen ist laut (Egle, et al., 2014) beim DHV Crystalactor[®] der größte Aufwand aufgrund des zusätzlichen Einsatzes von Essigsäure, Natronlauge und Schwefelsäure für eine optimierte Phosphor-Rücklösung zu verzeichnen. Allerdings ist nach den Daten des Vertreibers und anderer Studien kein übermäßiger Aufwand feststellbar, weswegen der genaue Chemikalienbedarf nicht exakt bestimmt werden kann. (Royal HaskoningDHV, 2014), (Hermann, 2009)

Im Gegensatz zum Crystalactor[®] kann beim P-RoC-Verfahren, bis auf geringe Mengen an NaOH oder Kalkmilch, vollständig auf einen Chemikalieneinsatz verzichtet werden, da das Kristallisationsmaterial Calcium-Silikat-Hydrat (ein Abfallprodukt aus der Bauindustrie) pH-Wert beeinflussende Eigenschaften besitzt. Bei Ostara PEARL[®] und PRISA beschränkt sich der Ressourcenaufwand auf ein geeignetes magnesiumhaltiges Fällmittel (z.B. MgCl₂, MgO) und eine Base (i.d.R. Natronlauge). (Egle, et al., 2014)

Hinsichtlich der Implementierung sind das Ostara PEARL[®] und das P-RoC-Verfahren die einfachsten, da keine größeren technischen Umbaumaßnahmen auf bestehenden Kläranlagen getätigt werden müssen. Auch für das REM NUT[®] Verfahren müssen keine Umbaumaßnahmen getätigt werden, jedoch ist eine Aufhebung der P-Elimination notwendig, was zu erheblichen Problemen führen kann (siehe Kapitel 8.4.2.). Beim PRISA-Verfahren kann die Installation eines Rührwerks oder ein Neubau

des Eindickers erforderlich sein. Nur beim Crystalactor® sind neben dem Reaktor größere Aufwendungen, wie z.B. Filtereinrichtungen und Anaerobbecken, notwendig. (Egle, et al., 2014)

Dies lässt auch auf die Komplexität der Verfahren schließen. Ostara PEARL® und P-RoC weisen die einfachste Betriebsweise auf. Auch PRISA besitzt ebenfalls eine einfache Betriebsweise, jedoch sind mehr Verfahrensschritte notwendig. Die höchste Komplexität ist beim DHV Crystalactor® gegeben, der die aufwändigste Betriebsweise aufgrund der zusätzlichen Einrichtungen und des größeren Ressourcenbedarfs aufweist. (Egle, et al., 2014)

Großtechnisch umgesetzt und betrieben werden derzeit der DHV Crystalactor® und das Ostara PEARL® Verfahren. Das P-RoC Verfahren wird seit Mitte 2013 in einer Pilotanlage getestet. Nach einer erfolgreichen Durchführung wird eine großtechnische Umsetzung folgen. Das PRISA Verfahren wird bereits im halbtechnischen Maßstab betrieben, jedoch sind bisweilen keine Pläne für die weiteren Vorhaben bekannt. (Egle, et al., 2014)

Phosphor-Rückgewinnungspotential

Das P-Rückgewinnungspotential bezüglich des Anlageninputs liegt zwischen 80 und 95 % (Egle, et al., 2014) und ist abhängig von der Verfahrensweise (Kristallisation oder Fällung) und der Prozesssteuerung (Fällmittelzugabe, Aufenthaltszeit, pH-Wert). Das Potential der Rückgewinnung ist bei Kristallisationsverfahren geringer als bei Fällungsverfahren, jedoch sind niedrigere pH-Werte (7,3 - 8) und geringere Fällmittelmengen als bei der Fällung (pH 8 - 9) notwendig. (Egle, et al., 2014)

Bezüglich der P-Fracht im Kläranlagenzulauf ist das Rückgewinnungspotential abhängig von vorgeschalteten Prozessen zur P-Rücklösung und liegt bei P-RoC und Ostara bei ca. 20 %, bei PRISA bei ca. 25 – 30 % und beim Crystalactor® bei max. 40 %. Im Vergleich zu P-RoC und Ostara besitzt das PRISA-Verfahren eine höhere Rückgewinnungsquote, was durch die gezielte Rücklösung im Vor-eindicker begründet ist. Diese Maßnahme ist allerdings auch bei Ostara und P-RoC möglich, was die Rückgewinnungsquote auf ein ähnliches Niveau anheben würde. (Egle, et al., 2014), (Montag, 2008)

Produkteigenschaft

Ein entscheidender Vorteil der Kristallisationsverfahren (Crystalactor®, PEARL®, P-RoC) ist, dass als Endprodukt Pellets mit beliebiger Korngröße hergestellt werden, die direkt in der Landwirtschaft einsetzbar sind. Bei Fällungsverfahren (PRISA) hingegen wird i.d.R. ein kristallines oder pulverförmiges Produkt gewonnen, das vor einem Einsatz in der Landwirtschaft noch in einem weiteren Prozessschritt verarbeitet werden muss. (Egle, et al., 2014)

Bezüglich der Produkteigenschaften treten jedoch Unterschiede auf. Generell können die Endprodukte in Magnesium-Ammonium-Phosphate (Ostara, PRISA, REM NUT®) und Calciumphosphate (P-RoC, DHV Crystalactor®) mit teils sehr hoher Reinheit eingeteilt werden. Das

Endprodukt aus P-RoC ist eigentlich ein mit Phosphor beladenes Calcium-Silikat-Hydrat, wird aber aufgrund der Abläufe bei der P-Rückgewinnung zur Gruppe der Calciumphosphate gezählt. Als Endprodukt des Crystalactor®-Prozesses kann neben CaP auch MAP erzeugt werden (Hermann, 2009). Wie anschließend beschrieben besitzt MAP wesentlich bessere Eigenschaften bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit, aufgrund der vorhandenen Daten wird jedoch CaP als Endprodukt des Crystalactors® angenommen. (Egle, et al., 2014)

Basierend auf standardisierten Extraktionsversuchen wurde bei allen Endprodukten eine Wasserlöslichkeit von unter 5 % ermittelt, während die Zitronensäurelöslichkeit bei über 90 % liegt.

Bei den MAP-Produkten der Verfahren Ostara PEARL®, PRISA und REM NUT® konnte durch Topfversuche über eine Vegetationsperiode gezeigt werden, dass die Pflanzenverfügbarkeit und Pflanzenaufnahme mit handelsüblichen Düngemitteln vergleichbar ist. Auf sauren Böden kann die Düngewirksamkeit als sehr gut und auf alkalischen Böden als mäßig bis gut eingestuft werden. Hingegen ist die Düngewirkung der Calciumphosphate aus dem DHV Crystalactor® und dem P-RoC Verfahren wesentlich schlechter und auf alkalischen Böden teilweise sogar unwirksam. Somit besitzen die Endprodukte des Ostara, PRISA und REM NUT® Verfahrens die besten Eigenschaften für eine direkte landwirtschaftliche Verwertung. (Egle, et al., 2014)

Die Resultate bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit korrelieren mit den Ergebnissen der durchgeführten Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten nach Römer (Römer, 2013). Dabei zeigten Calciumphosphat-Produkte eine deutlich geringere P-Aufnahme der Pflanzen, als bei Magnesium-Ammonium-Phosphaten. Beispielsweise erreicht das CaP-Produkt aus P-RoC auf Sandböden eine P-Aufnahme von 34 % und auf Lehmböden nahezu keine Aufnahme. Bei den MAP-Produkten sind i.d.R. P-Aufnahmeraten von 70 bis 100 % möglich, somit können die Produkte praktisch der Wirkung von Triple Superphosphat (TSP) gleichgestellt werden. (Römer, 2013)

Wirtschaftlichkeit

Obwohl die technologischen Ansätze der Verfahren häufig sehr einfach gestaltet sind, ist auch bei der Berücksichtigung möglicher Erlöse und Einsparungen, keine wirtschaftliche P-Rückgewinnung auf Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 100.000 EW gegeben. Die reinen Verfahrenskosten, ohne Berücksichtigung möglicher Einsparungen und Erlöse, betragen zwischen 6 und 12 €/kg P. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in den hohen Investitionskosten bei einem gleichzeitig niedrigen Potential der P-Rückgewinnung. Allerdings steigen die Investitionskosten sowie die Kosten für Personal, Energie und Wartung nicht proportional zu der Ausbaugröße der Kläranlage. Der Chemikalienbedarf ist der einzige konstante Kostenfaktor, der direkt proportional mit der Ausbaugröße steigt. Bei den Verfahren Ostara PEARL®, PRISA und P-RoC ist bereits ab einer Ausbaugröße von 200.000 EW ein

kostendeckender Betrieb möglich, wenn die Erlöse aus der Vermarktung des Endprodukts und die Einsparungen im Abwasserreinigungsprozess berücksichtigt werden. In diesem Fall sinken die produktspezifischen Kosten der Verfahren auf 2 – 6 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten auf 0,25 – 1,2 €/(E*a). Am besten schneidet dabei das P-RoC Verfahren mit 2 €/kg P und 0,25 €/(E*a) ab, dessen produktspezifischen Kosten damit unter dem aktuellen Marktpreis von 2,5 €/kg P liegen würden. Lediglich die Kosten des Crystalactors® können nicht im selben Ausmaß gesenkt werden. Diese liegen unter Berücksichtigung der Einsparungen und Erlöse bei ca. 10 €/kg P bzw. 2,5 €/(E*a). Somit ist aufgrund des höheren technischen Aufwands zur gezielten P-Rücklösung, bei diesem Verfahren derzeit kein wirtschaftlicher Betrieb möglich. (Egle, et al., 2014)

Laut des Abschlussberichts „PhoBe“ (Pinnekamp, et al., 2011) liegt der produktspezifische Preis bei P-RoC bei 12,5 €/kg P. Jedoch wird in dem Bericht von einer sehr geringen P-Zulaufmenge ausgegangen, was dementsprechend zu höheren Kosten führt. Für die Bewertung werden daher für das P-RoC Verfahren produktspezifische Kosten von 6 €/kg P angenommen (Egle, et al., 2014). Für das PRISA Verfahren liegen Daten bezüglich der einwohner- und produktspezifischen Kosten aus der Dissertation von Montag und dem Endbericht „Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser“ vor (Montag, 2008), (Egle, et al., 2014). In den beiden Arbeiten unterscheiden sich die Kosten nur geringfügig, weswegen die aktuelleren Daten nach (Egle, et al., 2014) verwendet werden. Die einwohnerspezifischen Kosten liegen demnach bei 1,45 €/(E*a) und die produktspezifischen Kosten bei ca. 8 €/kg P. Zu den übrigen Verfahren sind bezüglich der Herstellungskosten nur die Daten nach (Egle, et al., 2014) vorhanden.

Bezüglich der Investitionskosten ist die Installation des P-RoC Systems mit ca. 390.000 € das günstigste (Pinnekamp, et al., 2011). Bei PRISA würde die Implementierung etwa 1,2 Mio. € (Gethke-Albinus, 2012) und bei Ostara zwischen 2 und 4 Mio. € kosten (Montag, 2008). Für den Crystalactor® sind keine Daten zu den Investitionskosten vorhanden, jedoch werden diese hinsichtlich der komplexeren Betriebsweise als hoch eingestuft (Egle, et al., 2014).

Zum REM NUT® System sind diesbezüglich keine Daten vorhanden. Auf Basis der Daten einer Pilotanlage wurde das Verfahren ab einer Ausbaugröße von 200.000 EW zuerst als wirtschaftlich eingestuft. Jedoch ergaben Daten für die Umsetzung in einen großtechnischen Maßstab, dass die Kosten für die P-Rückgewinnung bei etwa 30 €/kg P liegen und somit wesentlich höher liegen, als bei den anderen Verfahren (Egle, et al., 2014).

Ökologische Bewertung

Metalle bzw. Schwermetalle sind im Schlammwasser nur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden, weswegen auf eine gezielte Schwermetall-Entfrachtung verzichtet werden kann. Der Schwermetallgehalt aller Endprodukte ist sehr gering und liegt deutlich unter den Gehalten

handelsüblicher Düngemittel. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm und Klärschlammasche. Zudem werden bei keinem der Verfahren Abfallstoffe erzeugt. Auch das Risiko bezüglich der Ausbringung organischer Spurenstoffe oder hygienischer Belastungen ist kaum oder gar nicht gegeben. (Egle, et al., 2014)

8.4.2. Zusammenfassung der Bewertung

Neben der deutlich schlechteren Wirtschaftlichkeit, weist das REM NUT® Verfahren einen weiteren Schwachpunkt auf. Generell muss bei allen P-Rückgewinnungsverfahren, die im Kläranlagenablauf Anwendung finden, die P-Elimination (Bio-P und /oder Fällung) aufgehoben werden. Allerdings befinden sich diese Verfahren am Ende der Abwasserbehandlung und stellen die letzte Barriere in der Kläranlage dar, um die Phosphat-Grenzwerte im Ablauf sowohl bei Volumen- als auch bei Konzentrationsschwankungen einzuhalten (Egle, et al., 2014). Treten Betriebsstörungen bei dem Verfahren auf, ist keine P-Elimination möglich und die P-Fracht gelangt ungehindert in den Vorfluter. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Selektivität von Ionentauschern bei Anionen wie PO_4^{3-} und Flüssigkeiten mit hohem Fremdstoffanteil nicht ausreichend ist und die Elektroden sehr schnell belegt sind (Egle, et al., 2014). Aufgrund dieser Schwachstellen kann die Technologie zur P-Rückgewinnung, die das Prinzip eines Ionentauschers als Verfahrensansatz verfolgt, derzeit nicht empfohlen werden. Aufgrund dessen wurde das REM NUT® Verfahren nur zu Vergleichszwecken in die Bewertung aufgenommen. Eine abschließende Beurteilung und die Bewertung mithilfe des Punktesystems werden dabei nicht durchgeführt.

Für die anderen Verfahren sind die wesentlichen Bewertungskriterien in folgender Tabelle nochmal zusammengefasst:

Tabelle 21 - Darstellung der wesentlichen Bewertungskriterien der P-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase (Egle, et al., 2014)

Kriterien	DHV Crystalactor®	Ostara PEARL®	PRISA	P-RoC
Anforderung an Abwasserreinigung	Bio-P	Bio-P	Bio-P	Bio-P
Komplexität Anlagentechnik	mäßig	sehr einfach	einfach	sehr einfach
Ressourcenaufwand	mäßig	gering	gering	sehr gering
Umsetzungsgrad	großtechnisch	großtechnisch	halbtechnisch	Pilotanlage
P-Rückgewinnungspotential bezogen auf Kläranlagenzulauf [%]	max. 40	~ 20	25 – 30	~ 20
Pflanzenverfügbarkeit/-Wirksamkeit	mäßig	sehr gut	sehr gut	mäßig
Schwermetall-Entfrachtung	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich
Verfahrenskosten [€/kg P] auf 100.000 EW Anlage	~ 12	~ 10	~ 8	~ 6
Schwermetallbelastung in Relation zu Handelsdünger	signifikant besser	signifikant besser	signifikant besser	signifikant besser
Abfallstoffe	nein	nein	nein	nein

Anhand der durchgeführten Bewertung kann bestimmt werden, welches Verfahren für das jeweilige Kriterium am besten abschneidet bzw. am besten geeignet ist (siehe Abbildung 21).

Verfahrensstruktur	<ul style="list-style-type: none">•P-RoC•Ostara PEARL®
P-Rückgewinnungspotential	<ul style="list-style-type: none">•Crystalactor®
Produkteigenschaft	<ul style="list-style-type: none">•Ostara PEARL®•PRISA
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none">•P-RoC
Ökologische Bewertung	<ul style="list-style-type: none">•Alle Verfahren gleichwertig

Abbildung 21 - Darstellung der am besten geeigneten Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium

Die Verfahren P-RoC und Ostara PEARL® weisen die einfachste Verfahrensstruktur auf. Hinsichtlich des möglichen P-Rückgewinnungspotentials schneidet der Crystalactor® am besten ab. Zur Herstellung eines Produkts mit hoher Pflanzenverfügbarkeit sind die Verfahren PRISA und PEARL® am besten geeignet. Hingegen bietet P-RoC eine sehr kostengünstige Betriebsweise und somit eine hohe Wirtschaftlichkeit. Bezüglich der Ökologischen Bewertung sind keine Unterschiede zu erkennen, alle Verfahren schneiden dabei sehr gut ab.

Mithilfe eines Punktesystems findet im folgenden Abschnitt eine zusätzliche Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse statt.

8.5. Punktevergabe und Diskussion

Für eine genauere Übersicht der Bewertung der einzelnen Kriterien werden die verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase mithilfe des in Kapitel 7.3. beschriebenen Punktesystems beurteilt. Die Kriterien werden mit Punkten von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) bewertet (Tabelle 22).

Tabelle 22 – Abschließende Bewertung der P-Rückgewinnung aus der flüssigen Phase mittels Punktevergabe

		DHV Crystalactor®	Ostara PEARL®	PRISA	P-RoC
Verfahrensstruktur	Umsetzungsgrad	5	5	3	4
	Komplexität	3	5	4	5
	Ressourcenaufwand	3	4	4	5
	Implementierung	3	5	4	5
	Mittelwert	3,5	4,75	3,75	4,75
P-Rückgewinnungspotential	P-Rückgewinnungspotential	<u>5</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>3</u>
Produkt-eigenschaften	Pflanzenverfügbarkeit	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>5</u>	<u>2</u>
Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten	3	3	4	5
	Betriebskosten	3	4	4	5
	Produktspez. Kosten	2	3	4	5
	Mittelwert	2,7	3,3	4	5
Ökologische Bewertung	Schwermetallgehalt	5	5	5	5
	Abfallstoffe	5	5	5	5
	Mittelwert	5	5	5	5
Erreichte Punktzahl (max. 25)		18,2	21,05	21,75	19,75
Endergebnis*		3,6	4,2	4,4	4

*Das Endergebnis wird in Relation zur maximal möglichen Punktzahl 5, wie folgt berechnet:

$$\text{Endergebnis} = \frac{\text{Erreichte Gesamtpunktzahl}}{\text{Maximale Gesamtpunktzahl}} \cdot 5$$

$$\text{Rechenbeispiel (P-RoC): } \frac{19,75}{25} \cdot 5 = 3,95 \approx 4 \text{ (gerundet)}$$

Die Verfahren P-RoC und Ostara PEARL® erreichen bezüglich der Verfahrensstruktur die höchste Punktzahl. Sie verfügen über eine einfache Betriebsweise bzw. geringe Komplexität und eine einfache Implementierung auf bestehenden Anlagen. Vorteilhaft an PEARL® ist die bereits vorhandene großtechnische Umsetzung, während im Vergleich dazu das P-RoC Verfahren einen noch geringeren Ressourcenaufwand aufweist. Am schlechtesten wird in diesem Fall das Crystalactor® Verfahren bewertet, da die Komplexität und der Ressourcenaufwand höher sind, als bei den anderen Verfahren. Außerdem gestaltet sich die Implementierung auf bereits bestehenden Anlagen schwieriger.

Hingegen bietet der DHV Crystalactor® das höchste P-Rückgewinnungspotential, gefolgt von PRISA. Die Verfahren P-RoC und Ostara PEARL® schneiden in diesem Fall schlechter ab und erhalten im Vergleich die niedrigste Punktzahl.

Hinsichtlich der Pflanzenverfügbarkeit erzielen die Verfahren PRISA und PEARL® die Höchstpunktzahl (5). Die Produkte beider Verfahren besitzen eine vergleichbare Düngewirkung wie handelsübliche Düngemittel. Bei P-RoC und dem Crystalactor® kann die Düngewirkung der Produkte als mäßig bis schlecht eingestuft werden, weswegen für dieses Kriterium jeweils nur zwei Punkte vergeben werden. Die schlechtere Pflanzenverfügbarkeit basiert auf den erzeugten Calciumphosphat-Endprodukten, die eine geringere Wirksamkeit als MAP-Produkte aufweisen. Da bei Crystalactor® als Endprodukt u.a. MAP erzeugt werden kann, ist eine mögliche Verbesserung der Düngewirkung gegeben. Jedoch liegen hierzu keine genauen Daten vor.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit besticht das P-RoC Verfahren aufgrund der niedrigen Investitions- und Betriebskosten sowie den geringsten produktspezifischen Kosten. Dadurch erhält das P-RoC Verfahren bei allen Kriterien hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit die höchste Punktzahl. Am schlechtesten schneidet der Crystalactor® ab, was durch die höheren Investitions- und Betriebskosten sowie den höchsten produktspezifischen Kosten begründet ist.

Bei der ökologischen Bewertung sind alle Verfahren mit der Höchstpunktzahl zu bewerten. Bei keinem der Prozesse werden Abfallstoffe erzeugt und die Schwermetallgehalte in den Endprodukten können als sehr gering eingestuft werden.

Insgesamt erreicht das PRISA Verfahren die höchste Punktzahl (21,75) und das beste Endergebnis mit 4,4 Punkten. Allerdings schneidet das Verfahren im Hinblick auf die jeweiligen Bewertungskriterien nur im Punkt Produkteigenschaft am besten ab (siehe auch Abbildung 21). Bei den anderen Kriterien besetzt es den zweiten oder dritten Platz (ausgenommen Ökologische Bewertung). Ein entscheidender Nachteil des Verfahrens ist der niedrige Umsetzungsgrad. Es wurde bisher nur im halbertechnischen Maßstab erprobt, weswegen bei einer großtechnischen Umsetzung noch unvorhersehbare Schwierigkeiten auftreten können. Außerdem sind derzeit keine Vorhaben zu einer Weiterentwicklung des Verfahrens bekannt. Eine Alternative zum PRISA Verfahren würde Ostara PEARL® bieten, das mit einem Endergebnis von 4,2 den zweiten Platz erzielt. Es wurde bereits großtechnisch umgesetzt und besitzt eine einfache Betriebsweise. Zudem weist das Endprodukt eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit auf. Der Nachteil ist die relativ geringe P-Rückgewinnungsrate und die geringere Wirtschaftlichkeit. Eine weitere Alternative bietet das P-RoC Verfahren aufgrund der sehr einfachen Betriebsweise und der sehr geringen Kosten. Somit bietet dieses Verfahren das geringste finanzielle Risiko. Nachteile hier sind die geringe P-Rückgewinnungsrate und die mäßig bis schlechte Düngewirkung.

Da in Hessen noch keine Erfahrungswerte zu P-Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase vorhanden sind, können diese Ergebnisse eine Hilfestellung für die Einführung bestimmter Verfahren bieten. Je nach Anforderung oder Schwerpunktsetzung sind unterschiedliche Verfahren am besten geeignet. Eine Möglichkeit ist zuerst ein sehr einfaches Verfahren mit einer hohen Wirtschaftlichkeit und geringem finanziellen Risiko einzuführen, um die Machbarkeit zu verdeutlichen und mit den gewonnenen Erfahrungswerten die Weiterentwicklung des Verfahrens voranzutreiben. In diesem Fall wäre der Einsatz des P-RoC Verfahrens zu empfehlen. Dies stellt auch eine Möglichkeit für Kläranlagen mit einer kleineren Ausbaugröße dar, die über kein hohes Finanzvolumen verfügen.

Wird der Schwerpunkt zusätzlich auf die Produkteigenschaft gelegt, ist das Ostara PEARL® Verfahren vorzuziehen, auch wenn die Wirtschaftlichkeit geringer ist. Auch bei PRISA weist das Produkt eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit auf, jedoch sind wie zuvor erwähnt noch keine Erfahrungen im großtechnischen Betrieb vorhanden.

Besteht die wesentliche Anforderung in der größtmöglichen Rückgewinnung von Phosphor, ist der DHV Crystalactor® zu wählen. Allerdings ist hier der finanzielle Aufwand deutlich größer.

9. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

Klärschlamm ist, im Gegensatz zu Schlammwasser, ein sehr inhomogenes Gemisch und besteht aus Wasser sowie organischen und anorganischen Bestandteilen. Der enthaltene Phosphor ist vorwiegend biologisch und/oder chemisch gebunden. Die notwendigen Prozessschritte einer P-Rückgewinnung aus Klärschlamm beinhalten die Rücklösung des chemisch und/oder biologisch gebundenen Phosphors, die Abtrennung aus der flüssigen Phase und die Überführung des Phosphors in eine für die Pflanze oder Industrie geeigneten Form. Voraussetzung für einen hohen Rückgewinnungsgrad ist eine größtmögliche Einbindung von P in den Klärschlamm durch eine chemisch-physikalische oder vermehrte biologische P-Elimination. Der Einsatz von Eisensalzen bei der chemisch-physikalischen Fällung wirkt sich kontraproduktiv auf die Rückgewinnung aus, da Eisen sehr starke Bindungseigenschaften besitzt. Zudem wirken sich hohe Eisengehalte negativ auf die Pflanzenverfügbarkeit aus. (Grünes, et al., 2014)

Ein weiterer Nachteil bei der Rückgewinnung aus Klärschlamm ist die Rücklösung von Schwermetallen während der Aufbereitung des Klärschlammes, z.B. durch Hydrolyse (Petzet, et al., 2010). Grundsätzlich gibt es fünf verschiedene Verfahrensansätze einer P-Rückgewinnung aus Klärschlamm, die im Folgenden näher beschrieben werden:

Nasschemische Verfahren

Bei dem nasschemischen Verfahren ist durch den Einsatz starker Säuren eine Rücklösung des im Klärschlamm gebundenen Phosphors von bis zu 90 % möglich. Beispielsweise liegt die Rücklösung bei einem pH-Wert von 3 zwischen 50 und 75 %. Bei einem pH-Wert von 2 ist die Rücklösung noch höher, jedoch ergeben sich durch den niedrigen pH-Wert neben der vermehrten Rücklösung von Schwermetallen betriebsbedingte Nachteile, wie das Versagen von Polymeren für die Entwässerung, eine erheblich schlechtere Entwässerbarkeit und ein überproportionaler Säureverbrauch im Vergleich zur Rücklösung von Phosphor. Bei den derzeit verwendeten Verfahren findet der Aufschluss i.d.R. bei pH-Wert 4 statt. Ein Problem des sauren Aufschlusses ist die gleichzeitige Rücklösung von Schwermetallen, die am besten noch vor der eigentlichen Rückgewinnung von Phosphor aus dem Prozess entfernt werden sollten. Möglichkeiten hierfür stellen eine Komplexierung der Schwermetalle oder eine Elimination aus dem Zentrat mittels sulfidischer Fällung dar. Zudem ist bei höheren pH-Werten (ab pH-Wert 4) nur eine geringfügige Rücklösung von Schwermetallen erkennbar, jedoch verringern sich dadurch die Rücklösung von P und die damit verbundene Rückgewinnungsrate deutlich. Als Endprodukt wird bei nasschemischen Verfahren MAP hergestellt. (Egle, et al., 2014)

Thermische Hydrolyse

Die Thermische Hydrolyse findet bei Temperaturen bis zu 165° C und Drücken von 5 – 7 bar statt. Der Großteil des im Klärschlamm biologisch gespeicherten Phosphors und Stickstoffs wird freigesetzt und liegt in gelöster Form vor. Durch die Zugabe von geeigneten Fällmitteln wird während der anschließenden Entwässerung des Schlamms Phosphor in Form von MAP gewonnen. Eisen- und Aluminiumionen wirken sich dabei störend auf den Prozess aus. (Egle, et al., 2014)

(Nass)Oxidation

Die (Nass)Oxidation verläuft unter ähnlichen Bedingungen wie die Thermische Hydrolyse. Der Unterschied liegt in einer vorherigen Ansäuerung des Schlamms und in einer Sauerstoffzufuhr während des Oxidationsvorgangs. Der biologisch und der chemisch gebundene Phosphor werden dabei rückgelöst sowie organische Substanzen vollständig oxidiert. Die Abtrennung der störenden Ionen erfolgt mithilfe von Filtrationsstufen. Abschließend wird Phosphor als MAP oder CaP gefällt. Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Nutzung des Energiepotentials des Schlamms infolge exothermer Reaktionen. (Egle, et al., 2014)

Superkritische Zustände

Überkritische Zustände werden im Reaktor bei einem Druck über 221 bar und Temperaturen von über 374° C erreicht, dabei werden die organischen Anteile des Klärschlammes fast vollständig oxidiert. Die entstehende Asche ist sehr reaktiv, weswegen Phosphor und Schwermetalle durch Säurezugabe leicht in Lösung gehen. Die einzelnen Verfahrensschritte bestehen aus der überkritischen Wasseroxidation, einer Gasabtrennung, dem Eindicken und dem Rückgewinnungsprozess. Auch hier ist eine Nutzung des Energiepotentials des Klärschlammes in Form von Wärmeenergie möglich. Als Produkt wird FeP und/oder CaP gewonnen. (Egle, et al., 2014)

Schmelzvergasung

Die Schmelzvergasung ist ein metallurgisches Verfahren. Bei Temperaturen über dem Ascheschmelzpunkt entstehen drei Materialströme: eine flüssige Metallphase, eine feste Schlackephase mit einer hohen Konzentration an Phosphor und eine gasförmige Phase mit leicht flüchtigen Schwermetallen. Das brennbare Gas kann als Energiequelle für die Verbrennungsprozesse genutzt werden. (Egle, et al., 2014)

9.1. Klärschlammaufkommen und Phosphor-Rückgewinnungspotential

Laut den ausgewerteten Eigenkontrolldaten der Betreiber der kommunalen Kläranlagen in Hessen, lag das Klärschlammaufkommen im Jahr 2012 bei 151.693 t TS, einschließlich der Zuschlagsstoffe zur Stabilisierung und Konditionierung. Davon wurden 77.106 t (51 %) der Verbrennung zugeführt, 54.598 t (36 %) fanden Anwendung in der Landwirtschaft und 19.989 t (13 %) im Landschaftsbau (siehe Tabelle 15). Bei einem durchschnittlichen Phosphat-Gehalt von 5 % im Klärschlamm ergibt sich ein theoretisches P-Potential von insgesamt 7.585 t P_2O_5 bzw. 3.307 t P (Schaum, et al., 2012).

Mit den bislang etablierten Verfahren zur P-Elimination in kommunalen Kläranlagen (Bio-P und/oder Simultanfällung) erreicht man eine Einbindung von ca. 90 % der P-Zulaufmenge im Schlamm (siehe Abbildung 16).

9.2. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

9.2.1. FIX-Phos

Entwickelt wurde das FIX-Phos-Verfahren vom Institut IWAR der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Projekts ProPhos „Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“. Bei dem Verfahren werden während der Klärschlammstabilisierung Calciumsilikathydrat-Partikel zugegeben. Der während der Faulung freigesetzte Phosphor wird als Calciumphosphat auf dem CSH fixiert und kann anschließend vom Klärschlamm abgetrennt werden. Die besten Wirkungsgrade bezüglich der Abtrennung und P-Rückgewinnung werden erzielt, wenn eine getrennte Faulung von Primärschlamm und Überschussschlamm erfolgt und die CSH-Partikel zum Überschussschlamm zugegeben werden. Die Rückgewinnungsrate des im Überschussschlamm gebundenen Phosphors beträgt zwischen 30 und 40 %. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Integrierbarkeit in die Klärschlammstabilisierung, weswegen keine weiteren bautechnischen Maßnahmen einer Rückgewinnungsanlage (z.B. Fällungs- oder Kristallisationsreaktoren) notwendig sind. Außerdem entfällt der Einsatz von Säuren und Laugen. (Petzet, et al., 2010)

Als Endprodukt erhält man ein schwermetallarmes Calciumphosphat (Hydroxylapatit), das sich als Ausgangsprodukt in der Düngemittel- und Phosphorindustrie eignet. Topfversuche haben gezeigt, dass auf Sandböden eine gute und auf Lehmböden eine mäßige Düngewirkung im Vergleich zu TSP (Triple Superphosphat) erreicht wird. Die Schwermetall-Grenzwerte der DüMV können deutlich unterschritten werden. Auch die Belastung mit organischen Schadstoffen kann als sehr gering

9. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

eingestuft werden, da die Werte signifikant unter den vorhandenen bzw. diskutierten Grenzwerten liegen. (Pinnekamp, et al., 2011)

Zusätzlich ergeben sich infolge der Zugabe von CSH zur Schlammstabilisierung weitere betriebliche Vorteile für die Kläranlage. Die Phosphatkonzentration im Schlammwasser wird reduziert, was zur Reduktion oder Verhinderung von MAP-Ausfällungen führt, die insbesondere bei Kläranlagen mit erweiterter biologischer P-Elimination zu Betriebsproblemen und höheren Kosten führen. Außerdem verbessert sich die Entwässerbarkeit der Faulschlämme und die Phosphorrückbelastung wird verringert. (Petzet, et al., 2010)

Die Ergebnisse zum FIX-Phos Verfahren sind auf Untersuchungen im Technikumsmaßstab zurückzuführen. Allerdings erfolgte bereits eine großtechnische Umsetzung des Verfahrens in Hildesheim. (Remy, et al., 2013)

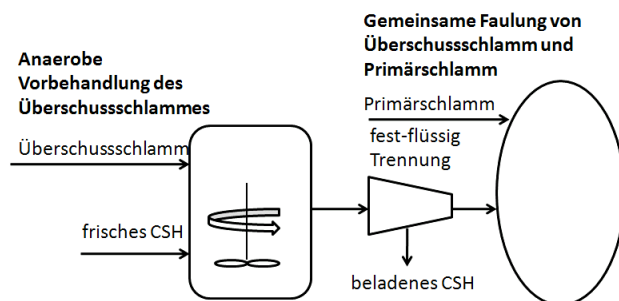


Abbildung 22 - Schematische Darstellung des FIX-Phos-Verfahrens (Pinnekamp, et al., 2011)

In der Praxis kann zwischen zwei Varianten unterschieden werden:

1. Getrennte Faulung von Primärschlamm (PS) und Überschussschlamm (ÜSS). Auf größeren Kläranlagen sind i.d.R. mehrere Faulbehälter und Voreindicker vorhanden, um eine getrennte Faulung durchzuführen. Das CSH wird gemeinsam mit dem ÜSS in einen Behälter zur anschließenden anaeroben Behandlung gegeben. Neue Investitionen beschränken sich lediglich auf Siebe und zusätzliche Leitungen.
2. Gemeinsame Faulung von PS und ÜSS für kleinere Kläranlagen, die nur über einen Faulbehälter verfügen. Der ÜSS wird nach der Voreindickung in einen Reaktor gegeben und mit CSH für 10 Tage anaerob behandelt. Danach wird das CSH mithilfe eines Siebs abgetrennt und der ÜSS gelangt zusammen mit dem Primärschlamm in den vorhandenen Faulbehälter. Als Investitionen ist der Bau eines Reaktors für 10 d $HRT_{ÜSS}$, eines Siebs und von Leitungen notwendig. (Pinnekamp, et al., 2011)

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit das CSH zur gemeinsamen Faulung des Primär- und Überschussschlammes zuzugeben, jedoch ist die Abtrennung des CSH nach der Stabilisierung aufgrund von Störstoffen im Primärschlamm mit erheblichem Aufwand verbunden.

Laut den Berechnungen des Verbundvorhabens „PhoBe“ kann bei einer Kläranlage mit 100.000 EW mithilfe des FIX-Phos-Verfahrens bei einem Überschussschlammanfall von 45 g TS/(E*a), einer Phosphorkonzentration von 3,6 P_{TS} und einem Rückgewinnungsgrad von 37 % eine Ausbeute von knapp 22.000 kg P/a bzw. 0,22 kg P/(E*a) erreicht werden. (Pinnekamp, et al., 2011)

Bezüglich der Investitionskosten beinhaltet Variante 1 die Errichtung eines CSH-Lagers, einer Förder- und Dosiereinrichtung, eines Bogensiebs und Speichers für das beladene CSH. Für Variante 2 muss zusätzlich ein Reaktionsbehälter für den ÜSS gebaut werden. Folgende Tabelle zeigt die exemplarischen Kosten beider Varianten:

Tabelle 23 - Kostenabschätzung FIX-Phos Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)

	Variante 1	Variante 2
Investitionskosten	70.600 €	1.410.000 €
Kapitalkosten	4.800 €/a	92.000 €/a
Betriebskosten	40.000 €/a	60.000 €/a

Variante 1 ist aufgrund des geringen bautechnischen Aufwands deutlich kostengünstiger als Variante 2. Besonders bei den Investitionskosten ist der Unterschied zu erkennen, die bei Variante 2 ca. 20-fach höher liegen als bei Variante 1. Nicht mit einbezogen wurden bei der Kostenabschätzung zukünftige Preissteigerungen.

Die produktspezifischen Kosten, d.h. die Kosten für die Herstellung von 1 kg sekundär gewonnenem Phosphat, betragen im günstigsten Fall 2,0 €/kg P für Variante 1 und im teuersten Fall 8,0 €/kg P für Variante 2 (mit Preissteigerung). Die einwohnerspezifischen Kosten belaufen sich bei Variante 1 auf 0,5 €/(E*a) und bei Variante 2 auf 1,5 €/(E*a). Auftretende Preissteigerungen wirken sich dabei nicht auf die einwohnerspezifischen Kosten aus. (Pinnekamp, et al., 2011)

Für die abschließende Bewertung der Verfahren werden die Daten der Variante 1 verwendet.

9.2.2. Stuttgarter Verfahren

Das Verfahren ist ein gemeinsames Projekt des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart und des IB iat – Ingenieurberatung, Stuttgart.

Grundlegend basiert das Verfahren auf der Rückgewinnung des Phosphors aus anaerob stabilisierten Klärschlämmen als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP bzw. Struvit). Es kann bei kommunalen Klärschlämmen eingesetzt werden, die mithilfe von Eisensalzen simultan gefällt wurden. Dabei sind keine Verfahrensumstellungen bei der Abwasserreinigung notwendig und das erzeugte MAP kann als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Die Schwermetall-Gehalte liegen unter den Grenzwerten der DüMV. (Preyl, 2012)

Eine Pilotanlage zur technischen Umsetzung dieses Verfahrens befindet sich in der Verbandskläranlage des Abwasserzweckverbands Raum Offenburg. Die Ausbaugröße der Kläranlage beträgt etwa 200.000 EW, angeschlossen sind derzeit ca. 160.000 EW. Die Pilotanlage wurde seitens des Anlagenbauers so dimensioniert, dass nur ein Teilstrom des Klärschlammes, der etwa 5.000 bis 10.000 EW entspricht, behandelt wird. Zur Elimination des Phosphors in der Kläranlage werden als Fällmittel Eisensalze verwendet. Die Pilotanlage besteht aus zwei Chargenbehältern, einem Absetzbecken, einer Kammerfilterpresse sowie aus Vorratsbehältern und Dosiereinrichtungen für die Betriebsmittel. Der Betrieb verläuft chargenweise. (Preyl, 2012)

Als erstes erfolgt in Behälter 1 die Rücklösung des im Faulschlamm gebundenen Phosphors mithilfe von Schwefelsäure. Die Säure bewirkt außerdem eine Verminderung der Schaumbildung in dem Behälter. Nach der Rücklösung erfolgt eine Fest-/Flüssigtrennung mithilfe der Kammerfilterpresse. In der Beschickungsleitung zur Kammerfilterpresse wird zum Faulschlamm eine Stammlösung aus speziellen synthetischen Polymeren sowie Brauchwasser gegeben, um die Schlammflockenbildung zu verbessern. Danach wird das Faulschlammfiltrat in Chargenbehälter 2 überführt. In dem Behälter erfolgen die Komplexierung, die Neutralisation und die MAP-Fällung. Als Komplexierungsmittel kommt Zitronensäure zum Einsatz, um ein erneutes Ausfallen der gelösten Metallionen als Metallphosphate zu unterbinden. Für die Neutralisation wird Natronlauge verwendet, um den pH-Wert wieder anzuheben. Die Anhebung des pH-Werts ist entscheidend, damit bei der anschließenden Zugabe von Magnesiumoxid das Phosphor in Form von MAP ausfällt. Nach diesem Verfahrensschritt wird das Faulschlammfiltrat mit den Fällprodukten in ein Absetzbecken überführt. Hier wird aus dem Überstand kontinuierlich und oberflächennah Faulschlammfiltrat abgezogen und der Absetztrichter wieder beschickt, um Nachfällungen und das Kristallwachstum des MAPs zu begünstigen. Der letzte Verfahrensschritt ist die Sedimentation, die abgesetzten Fällprodukte werden abgezogen, entwässert und getrocknet. (Preyl, 2012)

9. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

Nach (Niehörster, 2013) gibt der Geschäftsführer des Abwasserzweckverbands Raum Offenburg eine Zeitspanne von etwa einem Tag für den gesamten Prozessdurchlauf an. Der Phosphorrückgewinnungs-Gesamtwirkungsgrad beträgt dabei ca. 60 %, bezogen auf die der Anlage zugeführten Phosphorfracht (Klärschlamm).

Abbildung 23 gibt einen Überblick über den gesamten Prozess:

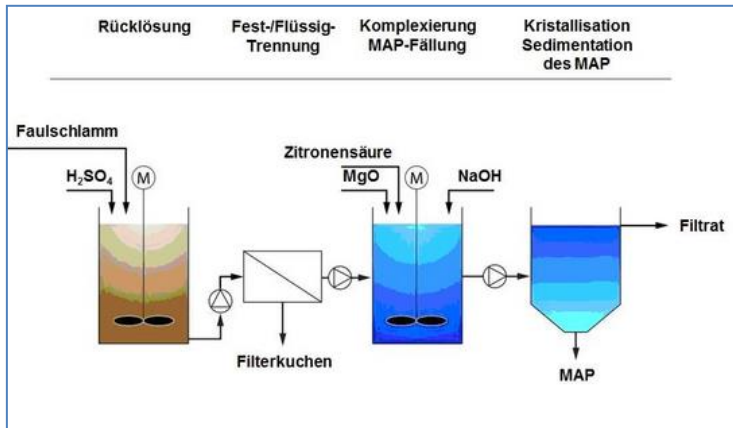


Abbildung 23 - Verfahrensschema Stuttgarter Verfahren (Preyl, 2012)

Folgende Produkterträge werden unter den spezifischen Randbedingungen (Schlammeigenschaften und Anlageneinstellungen) der Anlage zur Phosphor-Rückgewinnung auf der Verbandskläranlage des Abwasserzweckverbands Raum Offenburg erzielt. (Steinmetz, et al., 2014)

Tabelle 24 - Produkterträge - Stuttgarter Verfahren (Steinmetz, et al., 2014)

Angabe	Ertrag (Leaching bei pH 4,5)
P (elementar)	0,53 kg/m ³ FS bis 0,58 kg/m ³ FS
P₂O₅	1,2 kg/m ³ FS bis 1,3 kg/m ³ FS
MAP-Hexahydrat	3,7 kg/m ³ FS bis 4,1 kg/m ³ FS

FS = Faulschlamm

Für eine Abschätzung der spezifischen Kosten der Phosphor-Rückgewinnung mit den derzeitigen Einstellungen werden für den spezifischen Ertrag 0,50 kg pro m³ zu behandelndem Faulschlamm und für die Kosten der Betriebsmittel und des Stroms 4 bzw. 6 € pro m³ Faulschlamm angenommen.

Tabelle 25 - Kostenabschätzung - Stuttgarter Verfahren (Steinmetz, et al., 2014)

Angabe	Kosten		
	4 €/m ³ BM + S	6 €/m ³ BM + S	Weltmarkt
P (elementar)	8 €/kg	12 €/kg	ca. 2,5 €/kg
P₂O₅	3,50 €/kg	5,50 €/kg	0,40 bis 1,60 €/kg
MAP-Hexahydrat	1,00 €/kg	1,50 €/kg	0,50 €/kg

Umrechnung P (elementar) auf P₂O₅: 1 g P₂O₅ entspricht 0,436 g P;

MAP-Hexahydrat: Annahme 90 % reines MAP-Hexahydrat im Produkt;

BM: Betriebsmittel (Chemikalien);

S: Strom;

Bei den niedrigsten Betriebskosten von 4 €/m³ FS liegen die produktspezifischen Kosten bei 8 €/kg P bzw. für MAP-Hexahydrat bei 1 €/kg. Gegenüber dem Preis am Weltmarkt sind die Herstellungskosten für MAP immer noch doppelt so hoch. Da in Zukunft aber mit Preissteigerungen zu rechnen ist, könnte ein ökonomisch wirtschaftlicher Betrieb des Stuttgarter Verfahrens mittel- bis langfristig erreicht werden. Zu den einwohnerspezifischen Kosten sind derzeit keine Daten vorhanden.

Das gewonnene MAP wurde zudem nach der Parameterliste der Düngemittelverordnung untersucht. Als Ergebnis konnten keine Überschreitungen der Grenzwerte der DÜMV festgestellt werden; einige Parameter wie z.B. Blei oder Kupfer wurden weit unterschritten. (Steinmetz, et al., 2014)

Genauere Daten zu den Investitions- und Betriebskosten seitens der Hersteller konnten nicht ermittelt werden.

9.2.3. AirPrex® MAP-Verfahren

Das AirPrex® MAP-Verfahren wurde von den Berliner Wasserbetrieben (BWB) entwickelt und patentiert. Im Jahr 2006 hat die P.C.S. GmbH die Lizenz übernommen und ist somit der Anbieter des AirPrex® Verfahrens auf dem deutschen Markt.

In Kläranlagen kommt es häufig zu unerwünschten Folgeerscheinungen, wenn die chemische Phosphatfällung auf die biologische P-Elimination umgestellt wird. Infolge der anaeroben Schlammbehandlung wird abgetrenntes Schlammwasser wieder zurück in die Biologie geleitet, wodurch eine hohe P-Rückbelastung entsteht. Dies beruht darauf, dass unter anaeroben Bedingungen die in der Zelle gespeicherten Polyphosphate teilweise wieder freigesetzt werden und den ortho-Phosphatgehalt im Schlammsystem deutlich erhöhen. Häufig treten dabei Werte zwischen 50 und 200 mg/l PO₄-P im Schlammwasser der anaeroben Schlammbehandlung auf. (Pollution Control Service GmbH (P.C.S.), 2010)

In Abhängigkeit vom pH-Wert bilden sich durch die hohe Phosphatkonzentration in der biologischen Reinigungsstufe MAP-Kristallisationen (z.B. in Rohren und Leitungen). Diese Verkrustungen können den Kläranlagenbetrieb erheblich stören. Zudem führen die hohen P-Werte zu einer Stabilisation des im Schlamm vorliegenden, stark wasserbindenden Kolloidsystems. Dadurch sinken die Trockensubstanzgehalte bei der Entwässerung, während der Polymerbedarf steigt.

Diese Erscheinungen führen sinngemäß zu einer Steigerung des Betriebs- und Kostenaufwands auf Kläranlagen. Durch den Einsatz des AirPrex® Verfahrens wird der P-Gehalt im Prozess der Schlammbehandlung reduziert, wodurch die auftretenden Nachteile gemindert oder ganz beseitigt werden. Zudem wird MAP gewonnen, das als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen Verwendung findet. (Pollution Control Service GmbH (P.C.S.), 2010)

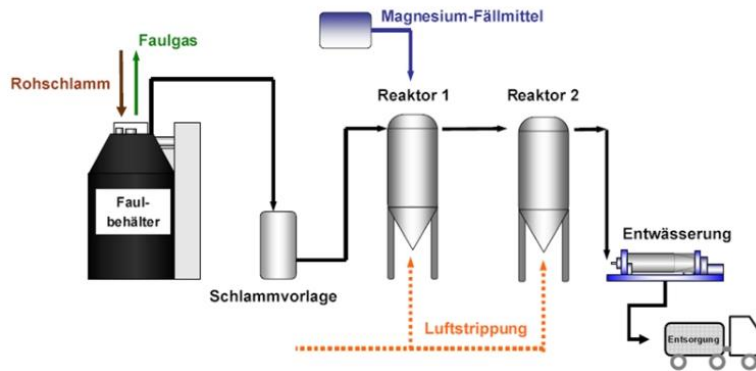
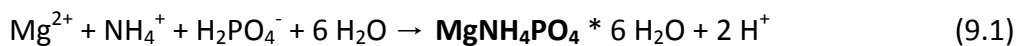


Abbildung 24 - Verfahrensschema AirPrex® MAP-Verfahren (Pollution Control Service GmbH (P.C.S.), 2010)

Nach der Behandlung des Rohschlammes im Faulbehälter gelangt der ausgefautete Schlamm in ein mehrstufiges Reaktorsystem und wird einer Luftstrippung unterzogen. Dadurch erzielt man das Ausgasen von CO_2 , wodurch der pH-Wert auf ca. 7,8 bis 8,2 ansteigt.

Simultan zur Strippung erfolgt eine Zugabe von Magnesium-Fällsalzen, was zur Bildung und Ausfällung von Magnesium-Ammonium-Phosphat führt. (Ewert, 2009)



Somit erreicht man eine Reduktion des $\text{PO}_4\text{-P}$ Gehalts auf Werte zwischen 10 und 20 mg/l und eine enorme Verminderung der P-Rückbelastung um 80-90 %. Gleichzeitig kommt es zu einer Reduzierung des Wasserbindevermögens im Schlamm, aufgrund der Abnahme der Phosphationen und der Zunahme der Anteile an 2-wertigen Metallionen. Letztlich bewirken diese Reaktionen die Bildung stabilerer, wenig wasserhaltiger Flocken und im Allgemeinen einen 3-6 % höheren Entwässerungswert.

Allerdings ist zu erwähnen, dass die Reaktionen noch nicht vollständig aufgeklärt sind und sich deutlich komplexer gestalten, als hier beschrieben. Die Parameter P-Gehalt, pH-Wert sowie Menge und Art des Fällmittels müssen präzise aufeinander abgestimmt sein, um eine erfolgreiche Prozessführung zu gewährleisten.

Dagegen ist die Abschöpfung der gewonnenen MAP-Kristalle sehr einfach. Durch Sedimentation kann MAP aus dem System getragen werden und nach einem relativ einfachen Waschvorgang ist das Produkt fertig zum Verkauf. (Ewert, et al., 2014)

Das MAP-Produkt kann im Sinne der DüMV als Düngemittel eingesetzt werden. Die Pflanzenverfügbarkeit konnte infolge von Topfversuchen nachgewiesen werden (Ewert, et al., 2014). Genauere Angaben zu Schwermetallgehalten oder Pflanzenverfügbarkeit seitens der Hersteller konnten nicht ermittelt werden.

Anhand eines Großversuchs auf dem Klärwerk Berlin Waßmannsdorf (1.000.000 EW) (Ewert, et al., 2014) konnte eine durchschnittliche Eliminationsrate von 130 mg/ l PO₄-P festgestellt werden, wodurch die Reduzierung der jährlichen P-Rückbelastung etwa 57 t PO₄-P beträgt. Die Kläranlage kann infolgedessen auf jegliche Zugabe von zusätzlichen Fällmitteln verzichten. Zudem wird im Ablauf der Anlage dauerhaft ein P-Gehalt von unter 0,5 mg/l eingehalten (Pollution Control Service GmbH (P.C.S.), 2010). Bei der MAP-Gewinnung kann mit ca. 2.500 kg/d gerechnet werden. Das gewonnene Produkt wird als Düngemittel unter dem Namen „Berliner Pflanze“ vermarktet. Der aktuelle Verkaufspreis liegt bei 60 bis 80 €/t. (Ewert, et al., 2014)

An der Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk (995.000 EW) ist seit 2009 das AirPrex[®] Verfahren in Betrieb. Die Kapazität beträgt 1.500 m³ Faulschlamm/d mit einer MAP-Gewinnung von ca. 1.500 kg/d.

Folgend ist eine Aufstellung der Investitionskosten und der theoretisch geschätzten MAP-Ausbeute für die Kläranlage. Da die Kostenabschätzung in 2009 durchgeführt wurde, ist mit einer Preisentwicklung zu rechnen. Da diese nicht quantifizierbar ist, werden die vorhandenen Daten verwendet. Außerdem sind für die anschließende Bewertung aktuellere Daten nach (Egle, et al., 2014) vorhanden.

Tabelle 26 – Kostenabschätzung: Investitionskosten und Erlös für AirPrex[®] MAP-Verfahren (Ewert, 2009)

Klärschlammmenge	1.500,00 m ³ /d
PO ₄ -Konzentration	500,00 mg/l
Investitionskosten	50.000,00 €
Nutzungsdauer	15 Jahre
Erlös MAP	60,0 €/t
Prozentuale MAP-Ausbeute	80,0 %
Theoretische MAP-Menge	1,5 t/d bzw. 561,5 t/a
Geschätzte Ausbeute	449,20 t/a
Kapitalkosten	4.817,11 €/a
Betriebskosten	7.500,00 €/a
Gesamtkosten	12.317,00 €/a
Gesamt-Erlös MAP	27.000,00 €/a

Für eine Kläranlage in dieser Größenklasse sind die Investitionskosten von 50.000 € als sehr gering einzustufen. Der geschätzte Erlös liegt dabei auf einem niedrigen Niveau. Nach dem Abzug der Gesamtkosten kann ein Gewinn von ca. 15.000 €/a auf der Kläranlage Mönchengladbach erzielt werden.

Das AirPrex[®] MAP-Verfahren wurde in erster Linie zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Schlammbehandlung und Optimierung des Schlammentwässerungsprozesses entwickelt. Der positive Nebeneffekt ist die Gewinnung von MAP, das nachweislich für Pflanzen verfügbar ist und der

Richtlinien der DüMV entspricht. Die theoretische Rückgewinnungsrate von 80 % bezieht sich auf MAP und nicht auf Phosphor, weswegen die P-Rückgewinnungsrate bezogen auf den Kläranlagenzulauf deutlich geringer ausfällt. Nach (Egle, et al., 2014) beträgt diese beim AirPrex® MAP-Verfahren rd. 20 %. Trotz der relativ geringen Ausbeute ist laut Betreiber eine wirtschaftliche Rückgewinnung von Phosphor gegeben. (Ewert, et al., 2014)

9.2.4. Gifhorner Verfahren

Das Gifhorner Verfahren ist eine Optimierung des Seaborne Verfahrens und wurde von der Firma Seaborne an der Kläranlage Gifhorn unter der wissenschaftlichen Begleitung der PFI Planungsgemeinschaft Hannover, des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig und des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover entwickelt. (Hermanussen, et al., 2012)

Grundsätzlich besteht das Seaborne Verfahren aus vier Prozessstufen zur Behandlung des stabilisierten Klärschlammes: Extraktion, Schwermetallfällung, Nährstoffrückgewinnungsstufe 1 (NRS 1) und Nährstoffrückgewinnungsstufe 2 (NRS 2)

Bei der Extraktionsstufe wird der pH-Wert des Faulschlammes auf ca. pH 3 ggf. pH 2 durch die Zugabe von 96 %-iger Schwefelsäure abgesenkt. Dies bewirkt die Rücklösung gebundener Nährstoff- und Schwermetallionen. Nicht säurelösliche Feststoffe sind vorwiegend organische Bestandteile, die mithilfe einer Zentrifuge abgetrennt werden. Für die Schwermetallfällung wird zuerst der pH-Wert des Zentrats der Extraktionsstufe mit Natronlauge erhöht. Bei einem pH-Wert von 4,5 erfolgt die Fällung mithilfe von Natriumsulfid (Na_2S). Die Trennung der ausgefällten Schwermetalle erfolgt über einen Leiblein-Filterfließapparat von 40 μm Porengröße. (Hermanussen, et al., 2012)

Anschließend gelangt das schwermetallarme Zentratswasser in die zwei NRS-Module. Im ersten Modul erfolgen die Zugabe von Magnesiumhydroxid und eine pH-Wert-Anhebung durch Natronlauge. Es kommt zur Fällung von MAP, das über eine Zentrifuge abgetrennt und gelagert wird. Im zweiten Modul wird das im Zentratswasser verbleibende Ammonium, das nicht zur MAP-Reaktion benötigt wurde, zurückgewonnen. Dies geschieht über eine übliche Ammoniakstrippung mit einer Desorptions- und Absorptionskolonne. In der Desorptionskolonne wird der pH-Wert durch Zugabe von Natronlauge auf 10,5 bis 11 angehoben, wodurch das Dissoziationsgleichgewicht soweit verschoben wird, dass Ammoniak als gelöstes Gas vorliegt und durch wasserdampfgesättigte Luft im Gegenstrom aufgenommen wird. Die ammoniakhaltige Luft gelangt anschließend in die Absorptionskolonne, in der eine Waschlösung aus Schwefelsäure den Ammoniak aufnimmt. Als Produkt erhält man Diammoniumsulfatlösung ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), die im Sumpf der Kolonne abgezogen und als Dünger weiterverwendet werden kann. (Hermanussen, et al., 2012)

Die schematische Darstellung des Verfahrens ist folgender Abbildung zu entnehmen.

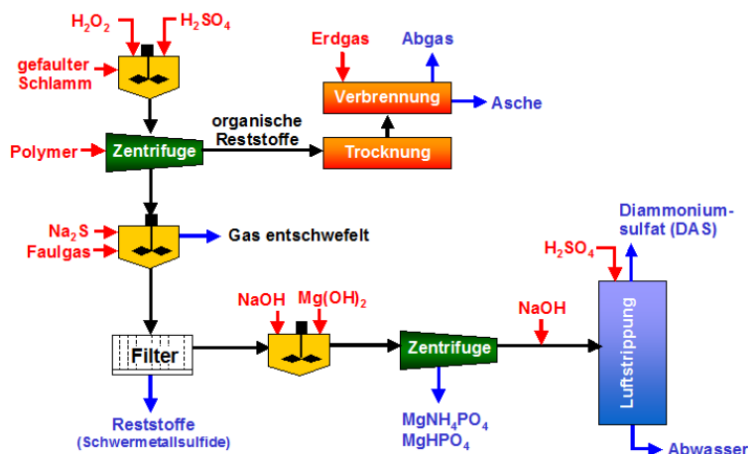


Abbildung 25 - Fließbild Seaborne Verfahren (Hermanussen, et al., 2012)

Infolge von Betriebsschwierigkeiten während der Erprobung des Seaborne Verfahrens, wurden in jedem Prozessschritt Optimierungsmaßnahmen ergriffen, die schließlich zum sogenannten „Gifhorner Verfahren“ führten.

Es galt drei Problembereiche zu lösen. Durch Schwierigkeiten bei der Fest/Flüssig-Trennung sowie Ausfällungen in der Strippskolonne konnte der Extraktionsschritt nur bei einem pH-Wert von 5 durchgeführt werden. Dadurch reduzierte sich die Menge an rückgelösten Phosphor auf 40 %. Desweiteren kam es infolge der pH-Wert Anhebung in der Nährstofffällung zu ungewollten Fällungen von Eisenphosphat. An der Kläranlage Gifhorn werden Eisensalze zur Phosphorfällung benutzt, das Eisen geht jedoch während des Ansäuerungsschritts teilweise in Lösung. Im Vergleich zu MAP und Calciumphosphat ist die Düngewirkung des Eisenphosphats relativ schlecht, weswegen das Eisen vor der Nährstofffällung entfernt werden sollte. Das dritte Problem besteht in Ablagerungen in der Strippsung, die durch Calciumionen im Schlammwasser ausgelöst werden.

An der TU Braunschweig wurde ein Ansatz zur gleichzeitigen Lösung der drei Problembereiche entwickelt, die in der Dissertation von Dr. Esemen „Untersuchung zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Nährstoffrückführung aus Klärschlamm“ aufgeführt sind. (Hermanussen, et al., 2012)

Die Optimierungsmaßnahmen zeigen, dass mit dem Gifhorner Verfahren eine Rückgewinnung des Phosphors in Form von MAP und Calciumphosphat von 50 bis 60 % und des gesamten Stickstoffs in Form von Ammoniumsulfat von fast 100 % möglich ist. Eisen wird während des Prozesses gefällt und abgeschieden und befindet sich somit nicht mehr im Düngeprodukt.

Das Verfahrensfliessbild des Gifhorner Verfahrens ist in Abbildung 26 dargestellt.

9. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

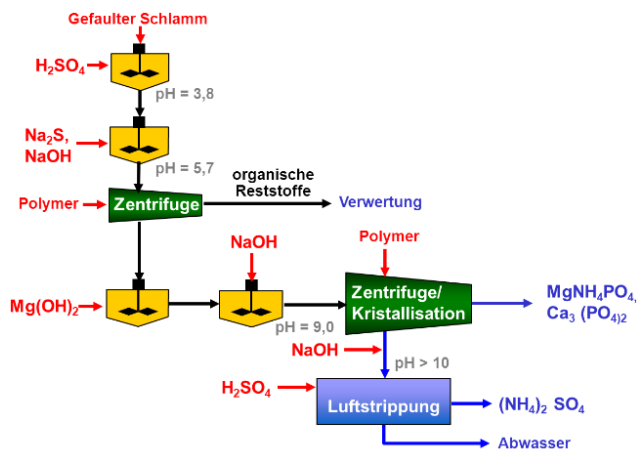


Abbildung 26 - Fließbild Gifhorner Verfahren (Hermanussen, et al., 2012)

Auf der Grundlage einer Kostenberechnung einer Modellkläranlage mit 100.000 EW wurden folgende Werte ermittelt:

Tabelle 27 - Kostenabschätzung Gifhorner Verfahren (Hermanussen, et al., 2012)

Faulschlammdurchsatz	250 m ³ /d
Betriebskosten (Chemikalien-, Energie- und Wartungsbedarf)	560.000 €/a
Kapitalkosten	272.000 €/a
Investitionskosten	3.020.000 €
Mögliche Einsparungen/Erlöse	104.000 €/a
Produktspezifische Kosten	8 €/kg P bzw. 1,2 €/kg MAP

9.2.5. Mephrec®

Bei Mephrec® (Metallurgisches Phosphor-Recycling) handelt es sich um ein modifiziertes metallurgisches Rückgewinnungsverfahren, das vom Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH (ingitec) mit der Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) entwickelt wurde. Mit dem Verfahren können neben Klärschlämme auch Tiermehle und Aschen aus der Monoverbrennung behandelt werden. (Scheidig, 2009)

Der erste Verfahrensschritt bei Mephrec® ist die Herstellung von Formlingen bzw. Briketts ausschließlich aus ungetrocknetem Klärschlamm (bis zu 80 % Wasser) oder aus einer Mischung mit Tiermehl und/oder phosphathaltigen Aschen. Die Formlinge werden in einem Kreislaufgas-Sauerstoff-Kupolofen bei einer Temperatur von bis zu 2000° C einer Schmelzvergasung unterzogen. Die flüssige Schlacke mit ca. 1450° C (in der sich das Phosphat befindet) wird abgetrennt und im Wasserbad granuliert. Schwermetalle mit einem höheren Schmelzpunkt wie Chrom, Nickel oder Kupfer legieren sich in einer Metallschmelze, die sich aufgrund der höheren Dichte unterhalb der

flüssigen Schlacke im Ofen sammelt und getrennt erfasst wird. Metalle mit einem niedrigeren Schmelzpunkt (z.B. Zink, Quecksilber) verdampfen und werden in der Gasreinigung abgeschieden. Aufgrund der hohen Temperaturen ist eine vollständige Zerstörung der organischen Schadstoffe gewährleistet. Als positiver Nebeneffekt entsteht während dem Prozess ein heizwertreiches Gas, welches energetisch verwertet werden kann. Das hergestellte Granulat kann nach einer mechanischen Aufbereitung direkt als Düngemittel eingesetzt werden. (Scheidig, 2009)

Zusammengefasst besticht das Mephrec® Verfahren durch die gleichzeitige stoffliche und energetische Verwertung des Klärschlammes in einem einzigen Prozessschritt. Das erzeugte Gas kann zum Synthesegas aufbereitet und in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Stromerzeugung genutzt werden. Die Abwärme der BHKWs wird zur Trocknung des Klärschlammes verwendet. Diese Maßnahmen tragen einen erheblichen Beitrag zu der Deckung des Eigenbedarfs einer Kläranlage.

Das erzeugte Endprodukt hat einen geringen Schwermetallgehalt, ist frei von organischen Schadstoffen und weist eine hohe Pflanzenverfügbarkeit auf. Es ist vergleichbar mit dem so genannten „Thomasmehl“, einem aus Thomas-Stahlwerken in der Stahlmetallurgie erzeugten phosphathaltigen Düngemittel, das bis in die 1960er Jahre in der Landwirtschaft Anwendung fand. (Scheidig, 2009)

Die Kostenermittlung ist Tabelle 28 zu entnehmen. Die Daten stammen aus dem Jahr 2009, dabei wurden Kostensteigerungen nicht berücksichtigt.

Tabelle 28 - Kostenabschätzung Mephrec® Verfahren (Scheidig, 2009)

Brikettherstellung	
Investitionskosten	2.150.000 €
Kapitalkosten	275.000 €/a
Betriebskosten	765.000 €/a
Mephrec®-Prozess	
Investitionskosten	8.500.000 €
Kapitalkosten	800.000 €/a
Betriebskosten	4.000.000 €/a
Mögliche Erlöse	6.000.000 €/a

Genauere Werte zu produkt- und einwohnerspezifischen Kosten seitens der Hersteller konnten nicht ermittelt werden.

Eine Pilotanlage ist in 2014/15 an der Kläranlage in Nürnberg mit einer Laufzeit von einem Jahr geplant (Herzel, et al., 2014).

9.2.6. Nicht bewertete Verfahren (PYREG und Budenheimer Verfahren)

PYREG

Das PYREG-Verfahren bzw. die PYREG Anlage wurde von der PYREG GmbH speziell für den dezentralen Einsatz in der Klärschlammbehandlung für kleinere Kläranlagen (10.000 – 50.000 EW) entwickelt. Es basiert auf der Vergasung von Klärschlamm unterhalb der Ascheerweichungstemperatur ($< 800^{\circ}\text{C}$) in einem selbstreinigenden Doppelwellenreaktor unter weitgehendem Luftabschluss, wodurch das Material nicht verbrannt, sondern karbonisiert wird. Im Gegensatz zu anderen Verfahren sind durch diese Betriebsweise keine Betriebsstörungen durch aufschmelzende Aschen zu beobachten. Das während der Behandlung entstehende Gasmisch wird in einer Brennkammer nach dem FLOX-Verfahren (FLOX = flammlose Oxidation) bei bis zu 1.250°C vollständig verbrannt. Staubemissionen treten aufgrund des indirekten Ausbrands der Festbrennstoffe im Gasbrenner nur in sehr geringem Maße auf. Außerdem wird die Spitzentemperatur durch den Betrieb der Brennkammer mit interner Rauchgasrückführung reduziert, wodurch eine thermische Bildung von NO_x verhindert wird. Die Grenzwerte nach der 17. BImSchV (Müllverbrennungsanlagen) werden regelmäßig eingehalten. Ein erheblicher Vorteil des Verfahrens ist der Energiebedarf. Es benötigt lediglich eine Initialenergie, um den Prozess in Gang zu bringen. Danach produziert es die eigene Betriebsenergie und infolge der Mineralisierung und Verbrennung wird sogar überschüssige Wärme erzeugt, die für Trocknungsprozesse und Optimierung der Entwässerung des Klärschlammes verwendet werden kann. (Löhde, 2014)

Hierbei ist zu vermerken, dass der Energiebedarf u.a. vom TS-Gehalt des Klärschlammes abhängt und folglich Aussagen zu der Energiebilanz mit Unsicherheiten behaftet sind.

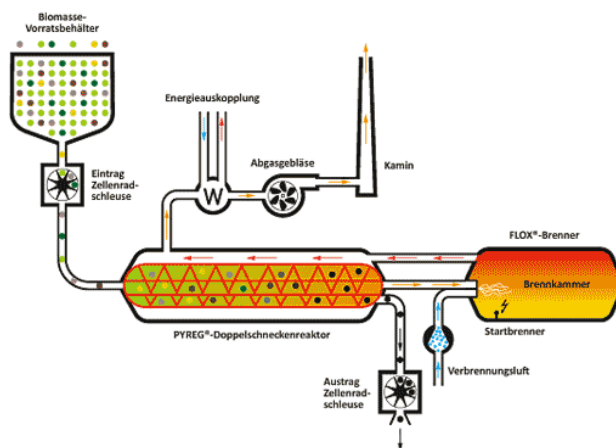


Abbildung 27 - Schematische Darstellung des PYREG-Verfahrens (PYREG GmbH)

Als Endprodukt entsteht ein kohleähnliches Substrat, das eine fast granulatartige Konsistenz aufweist und gemäß der Düngemittelverordnung als organischer Phosphor-Dünger deklarierbar ist. Durch die hohe Betriebstemperatur findet eine vollständige Hygienisierung statt, wodurch das Produkt problemlos auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht werden kann. (Löhde, 2014)

Da während dem Pyreg-Verfahren kein Phosphorverlust in der Austragsmenge zu verzeichnen ist, liegt das P-Rückgewinnungspotential bezogen auf die Eintragsmenge bei nahezu 100 %. Zudem weist das Substrat eine hohe Wasserlöslichkeit auf, was zu einer hohen Pflanzenverfügbarkeit führt. Dies ist ein Vorteil gegenüber den Produkten aus der P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche, welche eine sehr geringe Löslichkeit aufweisen. (Löhde, 2014)

Grundsätzlich bietet das PYREG-Verfahren viele Vorteile und hat ein deutliches Potential für eine zukünftig wirtschaftliche und qualitative Technologie zur P-Rückgewinnung. Da das Verfahren auf Kläranlagen noch nicht großtechnisch erprobt wurde, sind detaillierte Daten, wie z.B. Investitions- und Herstellungskosten oder Schwermetall-Entfrachtung, nicht zu ermitteln. Daher erfolgt keine vergleichende Bewertung mit den anderen Rückgewinnungsverfahren im folgenden Abschnitt.

Versuche zur Eignung von Klärschlamm-Pyrolysekohle als P-Dünger finden derzeit an der FH Bingen statt (Löhde, 2014).

Budenheimer Verfahren

Das Budenheimer Verfahren zählt zu den nasschemischen Verfahren und wurde von der Chemischen Fabrik Budenheim KG entwickelt. Im Gegensatz zu anderen Verfahren liegt die Besonderheit hier in der Nutzung von Kohlensäure für den Aufschluss, anstatt von Schwefel- oder Salzsäure. Der Prozess kann wie folgt beschrieben werden:

In einem Reaktor wird Klärschlamm mit Wasser versetzt, um den richtigen TS-Gehalt einzustellen (ca. 1,5 – 3,5 %). Der optimale TS-Gehalt ist dabei abhängig von der jeweiligen Klärschlammzusammensetzung. Gleichzeitig erfolgt eine Zugabe von CO₂ unter Druck (ca. 10 bar). Die entstehende Kohlensäure führt zu einer Verringerung des pH-Werts (ca. pH 5) und somit zu einer Rücklösung von Phosphat. Nach dem 30-minütigen Extraktionsschritt erfolgt eine fest/flüssig Trennung, wobei der phosphorarme Klärschlamm abgetrennt wird. Dieser kann anschließend entsorgt oder bspw. in der Zementindustrie verwendet werden.

Die flüssige Phase hingegen gelangt in einen Reaktor zur Phosphatfällung. Bis auf geringe Mengen an Kalkmilch ist für die Fällung kein weiterer Einsatz von Chemikalien notwendig. Es findet eine gezielt Austreibung des CO₂ statt, wodurch der pH-Wert wieder ansteigt und die Phosphate ausfallen und abgetrennt werden. Als Produkt entsteht pulverförmiges Dicalciumphosphat, das in Topfversuchen

9. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

sehr gute Ergebnisse bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit erzielt hat. Bei der Fällung wird darauf geachtet Phosphat nicht als Tricalciumphosphat zu fällen, da dieses sehr schlecht pflanzenverfügbar ist. Um das Produkt als Dünger einsetzen zu können, ist abschließend eine Granulation des Pulvers notwendig. Da der saure Aufschluss bei einem pH-Wert von ca. 5 durchgeführt wird, gehen kaum Schwermetalle in Lösung, was sich auf den Schwermetallgehalt im Endprodukt auswirkt. Dabei können die in der DüMV festgelegten Grenzwerte zum Teil deutlich unterschritten werden. (Stössel, 2014)

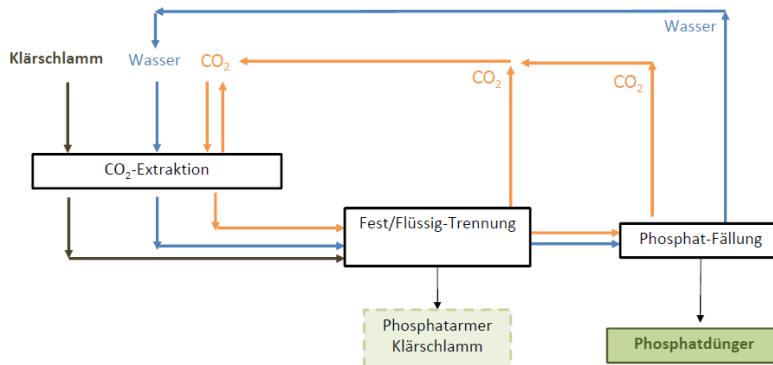


Abbildung 28 - Schematische Darstellung des Budenheimer Verfahrens (Stössel, 2014)

Ein weiterer Vorteil besteht in der Wiederverwendung des benötigten CO_2 und des Wassers, die (wie in Abbildung 28) kontinuierlich im Kreislauf geführt werden. Zudem benötigt die verhältnismäßig einfache Betriebsweise, die unter Raumtemperatur stattfindet, einen geringen Strombedarf, weswegen der Ressourcenaufwand insgesamt als sehr gering eingestuft werden kann. Das Verfahren befindet sich allerdings noch im Technikumsmaßstab, weswegen Abschätzungen für eine großtechnische Umsetzung mit Unsicherheiten behaftet sind. Geplant ist noch dieses Jahr (2014) eine 1m^3 - Anlage an der Mombacher Kläranlage (Mainz) zu installieren.

Die derzeitige Phosphor-Rückgewinnungsrate liegt bei ca. 50 % bezogen auf den Anlageninput. Nach Optimierungsmaßnahmen in der Gaseinbringung und der fest/flüssig-Trennung wird zukünftig ein Rückgewinnungspotential von 70 % angestrebt. Die derzeitigen produktspezifischen Kosten liegen bei 0,61 €/kg P. Im Vergleich zum aktuellen Marktpreis von Phosphor von 2,5 €/kg P, ist mit den deutlich geringeren Kosten des Verfahrens eine wirtschaftliche Betriebsweise möglich. (Stössel, 2014)

Generell kann das Verfahren in Kläranlagen aller Größenklassen eingesetzt werden. Der Vorteil der einfachen Betriebsweise und der einfachen Implementierung in bestehenden Anlagen (Installation zwischen Faulturm und Entwässerung), stellt vor allem für kleinere Kläranlagen eine interessante Variante der P-Rückgewinnung dar. Ein mögliches Einsatzgebiet wäre das System mit der mobilen Entwässerung zu verbinden. (Stössel, 2014)

Aufgrund der einfachen Betriebsweise, der geringen produktspezifischen Kosten und des geringen Ressourcenaufwands, insbesondere des nicht erforderlichen Chemikalienbedarfs, besitzt das

Budenheimer Verfahren ein großes Zukunftspotential im Bereich der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm. Versuche in einer großtechnischen Umsetzung werden zeigen, inwieweit das System im Vergleich zu anderen Verfahren konkurrenzfähig ist. Da noch keine konkreten Daten bspw. zu Investitions- und Betriebskosten sowie produktspezifische Kosten im großtechnischen Betrieb vorhanden sind, kann das Verfahren nicht in die anschließende vergleichende Bewertung mit aufgenommen werden. Der weitere Entwicklungsstand des Budenheimer Verfahrens sollte jedoch weiterverfolgt werden.

9.3. Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm

Alle Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm versuchen neben einer hohen P-Rückgewinnungsquote, gleichzeitig eine größtmögliche Entfernung von Metallen wie Eisen oder Aluminium, Schwermetallen, organischen Spurenstoffen und pathogenen Keimen zu erreichen. Theoretisch ist ein Rückgewinnungspotential von bis zu 90 % aus dem Klärschlamm (bezogen auf den Kläranlagenzulauf) erreichbar, unter der Voraussetzung, dass der gesamte im Klärschlamm enthaltene Phosphor zurückgewonnen wird. In der Praxis bzw. nach dem heutigen Stand der Technik ist keines der untersuchten Verfahren in der Lage, diesen Wert zu erreichen. (Egle, et al., 2014)

9.3.1. Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien

Verfahrensstruktur

Die Umsetzung der Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm liegt derzeit noch auf keinem einheitlichen Niveau, d.h. einige Verfahren wie FIX-Phos, AirPrex® oder Gifhorner Verfahren sind bereits auf Kläranlagen in Betrieb, während andere Verfahren, wie z.B. Stuttgarter Verfahren, in einer Pilot- oder halbtechnischen Anlage getestet werden. Das Mephrec® Verfahren wird voraussichtlich Ende 2014 großtechnisch umgesetzt.

Bezüglich des Ressourcenbedarfs stellen das AirPrex® und das FIX-Phos Verfahren die günstigsten Varianten dar, da diese abgesehen von dem Adsorptions- bzw. Kristallisationsmaterial (CSH bzw. Magnesium-Fällsalze) lediglich Strom für die Prozesssteuerung (Pumpen, Rührwerke, Belüftung) benötigen. Die nasschemischen Gifhorner und Stuttgarter Verfahren weisen aufgrund des zusätzlichen Säure- und Laogeneinsatzes einen deutlich höheren Ressourcenbedarf auf. Beim Mephrec® Verfahren ist kein Einsatz von Säure oder Lauge notwendig, jedoch ist neben dem Bedarf an Koks ein hoher Stromverbrauch für die Schmelzvergasung zu verzeichnen. Das Verfahren ist deutlich energie-

aufwändiger als die anderen Systeme, jedoch wird dabei Synthesegas erzeugt, das zur Strom- oder Wärmeerzeugung wiederverwendet werden kann. (Egle, et al., 2014)

Die geringste Komplexität besitzt das FIX-Phos Verfahren, da es lediglich einen Behälter für die Vermischung von Überschussschlamm mit CSH-Partikel mit anschließender fest-/flüssig Trennung benötigt. Auch das AirPrex[®] Verfahren ist einfach aufgebaut, lediglich die Luftstrippung führt zu einer geringfügig höheren Komplexität. Das Gifhorner und Stuttgarter Verfahren sind dagegen komplexer aufgebaut. Es sind mehrere Verfahrensschritte zur Rücklösung, fest-/flüssig Trennung, Fällung/-Kristallisation und Sedimentation notwendig. Zudem wirkt sich der höhere Ressourcenbedarf auf die Komplexität aus. Am schlechtesten schneidet hierbei Mephrec[®] ab, da es zwei verschiedene Systeme (Brikettherstellung und Kupolofen) benötigt, die eine aufwändige Prozesssteuerung aufweisen. (Egle, et al., 2014)

Bezüglich der Implementierung in bestehende Anlagen sind die Ergebnisse vergleichbar mit der Komplexität. AirPrex[®] und FIX-Phos sind aufgrund der einfachen Betriebsweise und dem geringen bautechnischen Aufwand sehr leicht zu implementieren. Beim Gifhorner und Stuttgarter Verfahren ist die Implementierung als mäßig einzustufen, da aufgrund der höheren Anzahl der Verfahrensschritte größere bautechnische Maßnahmen umzusetzen sind. Mephrec[®] schneidet erneut am schlechtesten ab, da die Installation des Verfahrens sehr aufwändig ist. (Egle, et al., 2014)

Phosphor-Rückgewinnungspotential

Das AirPrex[®] Verfahren besitzt mit 7 – 18 % das geringste P-Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf. Dies liegt u.a. an dem geringen Anteil an gelöstem Phosphor im Faulschlamm (10 – 30 %) und an der nicht vollständigen Abtrennung der erzeugten MAP-Kristalle aus dem Schlamm. Wie bereits bei der Beschreibung des AirPrex[®] Verfahrens erwähnt, ist die Technologie nicht in erster Linie für die P-Rückgewinnung entwickelt worden, sondern zur Verbesserung der Betriebsweise. (Egle, et al., 2014)

Das FIX-Phos Verfahren erreicht Rückgewinnungsraten zwischen 30 und 40 %, wenn die Zugabe der CSH-Partikel zu der getrennten Faulung des Überschussschlamm erfolgt. (Petzet, et al., 2010)

Infolge eines nasschemischen Aufschlusses (z.B. Gifhorner-Verfahren, Stuttgarter Verfahren) ist theoretisch eine P-Rücklösung von bis zu 90 % möglich. Jedoch muss hierfür der saure Aufschluss bei einem pH-Wert von 2 durchgeführt werden, was zu bereits erwähnten prozesstechnischen Problemen führt. Die Absenkung des pH-Werts auf 2 ist zudem mit einem hohen Säureverbrauch verbunden, wodurch die entstehenden Kosten für den Säurebedarf in keinem angemessenen Verhältnis zu der erhöhten P-Rücklösung stehen. Aufgrund dessen findet derzeit der Betrieb von nasschemischen Verfahren i.d.R. bei pH-Werten von 4 – 5 statt, wobei eine P-Rücklösung von 50 – 60 % erreichbar ist. Dadurch liegt das P-Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf im

Falle eines sauren Aufschlusses bei max. 50 %. Dieser Wert sollte als Richtwert für nasschemische Verfahren verstanden werden, da die Rücklöseprozesse zum Teil großen Schwankungen unterliegen, die den Ertrag beeinflussen können. (Egle, et al., 2014)

Die Bestimmung des Rückgewinnungspotentials für das metallurgische Mephrec[®]-Verfahren ist mit größeren Unsicherheiten behaftet, da ein Teil des Phosphors während des Prozesses über das Rauchgas oder durch den Verbleib in der schwermetallhaltigen Schlacke verloren gehen kann. Bezogen auf den Ausgangsgehalt an Phosphor im Klärschlamm können 60 – 80 % im Schlackegranulat zurückgewonnen werden. Das P-Rückgewinnungspotential bezogen auf den Kläranlagenzulauf liegt in einem Bereich von 50 – 70 % und ist somit im Vergleich zu den anderen Verfahren das effektivste. (Egle, et al., 2014)

Produkteigenschaften

Die Endprodukte der Verfahren sind im Wesentlichen MAP und CaP mit teils sehr hoher Reinheit. Die Ausnahme stellt das Produkt des Mephrec[®] Verfahrens dar, bei dem es sich um eine phosphorreiche Schlacke (ähnlich Thomasmehl) handelt. Standardisierte Extraktionsversuche haben gezeigt, dass die Wasserlöslichkeit aller Endprodukte unter 5 % liegt. Hingegen liegt die Zitronensäurelöslichkeit der Produkte aus AirPrex[®] und Mephrec[®] bei über 90 % und aus dem Gifhorner und Stuttgarter Verfahren bei ca. 60 %. Der Grund für die geringere Löslichkeit der Produkte des sauren Aufschlusses basiert auf Rücklöseprozesse verschiedener Fällionen wie Mg, Ca oder auch Fe und Al, die bei der Fällung schwer lösliche Salze bilden. (Egle, et al., 2014)

Daten hinsichtlich der Wasser- und Zitronensäurelöslichkeit sind für das FIX-Phos Verfahren nicht vorhanden.

Topfversuche zur Düngewirkung haben gezeigt, dass die hergestellten Magnesium-Ammonium-Phosphate hinsichtlich der Pflanzenverfügbarkeit und Pflanzenaufnahme innerhalb einer Vegetationsperiode ähnliche Ergebnisse erzielen, wie bei der Verwendung handelsüblicher Mineraldünger. Die Wirkung der MAP-Produkte ist auf sauren Böden als sehr gut und auf alkalischen Böden als gut einzuordnen. Ähnliche Ergebnisse erzielten auch die Produkte des Stuttgarter und Gifhorner Verfahrens. Beim Gifhorner Verfahren ist zu erwähnen, dass das hergestellte MAP Produkt eine geringere P-Aufnahmeeffizienz als das Produkt des Stuttgarter Verfahrens besitzt (Römer, 2013). Dies ist auf den vergleichsweise hohen Eisengehalt von 5,5 % im dortigen Klärschlamm zurückzuführen. Hingegen ist bei Magnesium-Phosphaten aus dem Gifhorner Verfahren eine dem TSP vergleichbare P-Aufnahme feststellbar. (Römer, 2013)

Das Produkt aus Mephrec[®] besitzt nur auf alkalischen Böden eine gute Düngewirkung. Auf sauren Böden wurde infolge der Topfversuche beinahe keine Wirkung festgestellt (Egle, et al., 2014). Ein ähnliches Ergebnis wurde auch durch (Römer, 2013) festgestellt, wobei das Mephrec[®]-Produkt auf

sauren Böden eine P-Aufnahme von ca. 24 % aufwies und auf alkalischen Böden ein dem TSP vergleichbare P-Aufnahme.

Beim Endprodukts aus FIX-Phos haben Topfversuche eine gute Düngewirkung auf Sandböden und eine mäßige Wirkung auf Lehm Böden gezeigt (Pinnekamp, et al., 2011). Allerdings haben andere Untersuchungen bezüglich der P-Aufnahme von Pflanzen gezeigt, dass bei dem Produkt auf Lehm Böden nahezu keine P-Aufnahme vorhanden war und auf Sandböden nur eine P-Aufnahme von ca. 34 %, bezogen auf TSP (Römer, 2013). Daher wird die Düngewirkung des FIX-Phos Produkts als mäßig eingestuft.

Wirtschaftlichkeit

Eine ökonomische Bewertung mit vergleichender Kostenrechnung ist aufgrund des unterschiedlichen Umsetzungsgrades der Verfahren mit deutlichen Unsicherheiten versehen. Für einen Vergleich der Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) der Rückgewinnungsverfahren wird die Implementierung in einer Kläranlage mit 100.000 EW angenommen. Bei Mephrec® beziehen sich die Daten auf eine Umsetzung mit einem Durchsatz von jährlich 16.000 t Klärschlamm (TS), was in etwa der Belastung einer Kläranlage mit 1.000.000 EW entspricht. (Egle, et al., 2014)

Bezüglich der einwohnerspezifischen Kosten stellen das FIX-Phos Verfahren (Variante 1) mit ca. 0,5 €/E*a) und das AirPrex® Verfahren mit ca. 0,8 €/E*a) die günstigsten Alternativen dar. Beim Gifhorner und Stuttgarter Verfahren sowie beim Mephrec® Verfahren liegen die Kosten im Bereich von 4 – 6 €/EW*a). Bezüglich der produktspezifischen Kosten ist die Einteilung ähnlich. Das FIX-Phos Verfahren (Variante 1) besitzt die geringsten Kosten mit ca. 2 €/kg P, wodurch eine wirtschaftliche Betriebsweise gegeben ist. Danach folgt das AirPrex® Verfahren mit ca. 8 €/kg P. Im Vergleich zu den einwohnerspezifischen Kosten sind 8 €/kg P bei AirPrex® relativ hoch, dies ist jedoch auf das geringe Rückgewinnungspotential zurückzuführen. Die produktspezifischen Kosten beim Stuttgarter und Gifhorner Verfahren liegen bei etwa 12 – 14 €/kg P und beim Mephrec® Verfahren bei 13 – 14 €/kg P. Somit liegen die Verfahrenskosten um ein vielfaches über dem Marktpreis von 2,5 €/kg P, ausgenommen FIX-Phos. (Egle, et al., 2014), (Pinnekamp, et al., 2011)

Nach (Hermanussen, et al., 2012) betragen die produktspezifischen Kosten des Gifhorner Verfahrens 8 €/kg P, womit diese deutlich unter den 13 €/kg P nach (Egle, et al., 2014) liegen. Da sich beide Kostenabschätzungen auf eine Kläranlage mit 100.000 EW beziehen, wird für die endgültige Bewertung der Mittelwert von 10,5 €/kg P angenommen.

Allerdings ist bei der Bestimmung der Kosten zu erwähnen, dass die Bezugsquellen nicht aus demselben Jahr stammen und somit Preisentwicklungen nicht berücksichtigt wurden.

Bezüglich der Investitionskosten können erneut die beiden Verfahren FIX-Phos und AirPrex® als die günstigsten Varianten mit rd. 70.000 € bzw. 50.000 € eingestuft werden. Für das FIX-Phos Verfahren

wird die günstigere Variante angenommen. Bei einer kompletten Neuinstallation würden die Investitionskosten ca. 1,4 Mio. € betragen (Pinnekamp, et al., 2011). Die Betriebskosten beider Verfahren befinden sich auf einem ähnlich niedrigen Niveau zwischen 5.000 und 13.000 €. Zum Stuttgarter Verfahren sind keine exakten Daten zu den Investitions- und Betriebskosten vorhanden. Da der Verfahrensansatz jedoch dem Gifhorner Verfahren ähnelt, kann ein vergleichbares Kostenniveau angenommen werden. Die Investitionskosten belaufen sich beim Gifhorner Verfahren auf ca. 3 Mio. € und die Betriebskosten auf ca. 560.000 €/a (Hermanussen, et al., 2012). Das teuerste Verfahren ist Mephrec® mit Investitionskosten von ca. 10,5 Mio. € und Betriebskosten von rd. 4,8 Mio. €/a (Scheidig, 2009).

Bei einer Übertragung auf größere Kläranlagen (> 100.000 EW) kann grundsätzlich behauptet werden, dass die Investitionskosten sowie die Kosten für Personal, Energie und Wartung nicht proportional zunehmen. Der einzige konstante Kostenfaktor ist der Chemikalienverbrauch, der direkt proportional mit der Kläranlagengröße und damit mit der Menge an Klärschlamm ansteigt. (Egle, et al., 2014)

Im Hinblick auf die Kosten der P-Rückgewinnung muss betont werden, dass infolge möglicher Einsparungen sowie Erlöse aus dem Verkauf des Produkts oder durch die Wiederverwendung der Energie die Kosten erheblich reduziert werden können (Egle, et al., 2014). Insbesondere bei Mephrec® sind beachtliche Einsparungen und Erlöse von schätzungsweise 6 Mio. €/a möglich, wodurch eine wirtschaftliche Betriebsweise gegeben wäre (Scheidig, 2009).

Ökologische Bewertung

Hinsichtlich anfallender Reststoffe schneiden das AirPrex® und FIX-Phos Verfahren erneut am besten ab, da keine Abfallstoffe produziert werden (Egle, et al., 2014), (Pinnekamp, et al., 2011). Bei Mephrec® wird die organische Substanz nahezu vollständig oxidiert, weswegen die Reststoffe direkt abgelagert werden können. Aufwändiger ist die Entsorgung der Reststoffe aus den nasschemischen Verfahren. Aufgrund des Einsatzes von Schwefelsäure fällt ein Schlamm mit niedrigem pH-Wert und hohem Schwefelgehalt an, der problematischer zu entsorgen ist. Zudem besteht die Möglichkeit, wie im Falle des Stuttgarter Verfahrens, dass ein schwermetallhaltiger Überstand anfällt, der in der Kläranlage gereinigt werden muss. (Egle, et al., 2014)

Hinsichtlich der Schwermetallgehalte ist bei den nasschemischen Verfahren trotz der teilweisen Schwermetallrücklösungen eine weitgehende Entfrachtung der Schwermetalle erkennbar. Im Endprodukt befindet sich nur ein sehr geringer Anteil der im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle. Ähnliches ist bei dem Produkt aus dem AirPrex® und FIX-Phos Verfahren festzustellen. Beim Mephrec® Verfahren zeichnet sich auch eine Verringerung der Schwermetallgehalte ab, allerdings nicht in der Größenordnung wie bei den anderen Verfahren. Die quantitative

Bestimmung ist aufgrund der schwierigen Erfassung der Stoffströme (Stäube, Schlacke und Eisen) sowie Schwankungen in der Analyse mit Unsicherheiten behaftet. Festzustellen ist, dass im Endprodukt weder Quecksilber noch Zink vorhanden sind, jedoch der Gehalt an Arsen, Chrom, Kupfer und Cadmium um ein vielfaches höher ist, als bei den anderen Verfahren. Insgesamt liegen die Schwermetallgehalte aller Endprodukte unter den Grenzwerten der Düngemittelverordnung. (Egle, et al., 2014)

9.3.2. Zusammenfassung der Bewertung

Die wesentlichen Bewertungskriterien für P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm sind in folgender Tabelle nochmal zusammengefasst:

Tabelle 29 - Zusammenfassende Darstellung der Bewertung (Egle, et al., 2014)

Kriterien	AirPrex®	Mephrec®	Gifhorner Verfahren	Stuttgarter Verfahren	FIX-Phos
Anforderung an Abwasserreinigung	Bio-P	nein	nein	nein	Bio-P
Komplexität Anlagentechnik	gering	hoch	mäßig	mäßig	sehr gering
Ressourcenaufwand	gering	hoch	mäßig	mäßig	gering
Umsetzungsgrad	groß-technisch	groß-technisch	groß-technisch	Pilotanlage	groß-technisch
P-Rückgewinnungspotential bezogen auf Kläranlagenzulauf [%]	7 - 18	50 – 70	40 – 50	40 – 50	30 – 40
Pflanzenverfügbarkeit/-Wirksamkeit	sehr gut	mäßig	sehr gut	sehr gut	mäßig
Schwermetall-Entfrachtung	nicht erforderlich	mäßig	sehr gut	sehr gut	nicht erforderlich
Verfahrenskosten [€/kg P] auf 100.000 EW Anlage	~8	~ 14	~10	~13	~2
Schwermetallbelastung in Relation zu Handelsdünger	signifikant besser	besser/ähnlich	gering	gering	signifikant besser
Abfallstoffe	nein	ja	ja	ja	nein

Infolge der ausführlichen Bewertung können für das jeweilige Bewertungskriterium die besten Verfahren dargestellt werden (siehe Abbildung 29):

Verfahrensstruktur	<ul style="list-style-type: none"> •FIX-Phos •AirPrex®
P-Rückgewinnungspotential	<ul style="list-style-type: none"> •Mephrec®
Pflanzenverfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> •AirPrex® •Stuttgarter Verfahren •Gifhorner Verfahren
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> •FIX-Phos •AirPrex®
Ökologische Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> •FIX-Phos •AirPrex®

Abbildung 29 - Darstellung der besten Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm für das jeweilige Bewertungskriterium

Die beiden Verfahren FIX-Phos und AirPrex® schneiden bei den Bewertungskriterien Verfahrensstruktur, Wirtschaftlichkeit und Ökologische Bewertung am besten ab. Zusätzlich wird das AirPrex® Verfahren, neben Stuttgarter und Gifhorner Verfahren, bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit am besten bewertet. Hingegen schneidet das Mephrec® Verfahren nur im Punkt P-Rückgewinnungspotential am besten ab.

Eine zusätzliche Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse wird mithilfe eines Punktesystems im folgenden Abschnitt durchgeführt.

9.4. Punktevergabe und Diskussion

Für eine genauere Übersicht der Bewertung der einzelnen Kriterien werden die verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm mithilfe des in Kapitel 7.3. beschriebenen Punktesystems beurteilt. Die Kriterien werden mit Punkten von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) bewertet (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30 - Abschließende Beurteilung der P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm mittels Punktevergabe

		AirPrex®	Mephrec®	Gifhorner Verfahren	Stuttgarter Verfahren	FIX-Phos
Verfahrensstruktur	Umsetzungsgrad	5	5	5	4	5
	Komplexität	4	2	3	3	5
	Ressourcenaufwand	4	2	3	3	4
	Implementierung	5	2	3	3	5
	Mittelwert	4,5	2,75	3,5	3,25	4,75
P-Rückgewinnungspotential	P-Rückgewinnungspotential	2	5	4	4	3
Produkt-eigenschaften	Pflanzenverfügbarkeit	5	3	5	5	3
Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten	5	1	3	n.v. (3)*	5
	Betriebskosten	5	1	3	n.v. (3)*	4
	Produktspezif. Kosten	4	2	3	2	5
	Mittelwert	4,7	1,3	3	2,7	4,7
	Mittelwert	4,7	1,3	3	2,7	4,7
Ökologische Bewertung	Schwermetallgehalt	4	3	4	4	4
	Abfallstoffe	5	4	3	3	5
	Mittelwert	4,5	3,5	3,5	3,5	4,5
	Mittelwert	4,5	3,5	3,5	3,5	4,5
Erreichte Punktzahl (max. 25)		20,7	15,55	19,0	18,45	19,95
Endergebnis		4,1	3,1	3,8	3,7	4

* Daten zu den Investitions- und Betriebskosten sind nicht vorhanden (n.v.). Da der Verfahrensansatz dem Gifhorner Verfahren ähnelt, wird die gleiche Punktzahl angenommen.

Das Endergebnis wird, wie bereits in Kapitel 8.5. erläutert, in Relation zur maximal möglichen Punktzahl 5 berechnet.

Bezüglich der Verfahrensstruktur wird das FIX-Phos Verfahren mit 4,75 Punkten am besten bewertet. Es wurde bereits großtechnisch umgesetzt, besitzt eine sehr einfache Betriebsweise und kann problemlos in bestehende Kläranlagen implementiert werden. Zudem besticht es durch einen geringen Ressourcenbedarf. Ähnliches gilt auch für das AirPrex® Verfahren, das diesbezüglich 4,5 Punkte erzielt. Lediglich die vorhandene Luftstrippung führt dazu, dass die Komplexität auf einem etwas höheren Niveau liegt, als bei FIX-Phos. Dagegen erreicht das Mephrec®-System hinsichtlich der Verfahrensstruktur die niedrigste Punktzahl (2,75). Trotz des hohen Umsetzungsgrads, wirken sich die hohe Komplexität, der hohe Ressourcenaufwand und die aufwändigere Implementierung negativ auf die Bewertung aus. Die beiden nasschemischen Verfahren, Gifhorner und Stuttgarter Verfahren, erreichen 3,5 bzw. 3,25 Punkte. Beide verfügen über eine etwas höhere Komplexität, einen mäßigen Ressourcenbedarf und einen mäßigen Aufwand zur Implementierung. Das Gifhorner Verfahren schneidet geringfügig besser ab, da es aufgrund der großtechnischen Umsetzung einen höheren Umsetzungsgrad besitzt.

Beim P-Rückgewinnungspotential hingegen schneidet das Mephrec® Verfahren mit der Höchstpunktzahl 5 am besten ab. Auch das Stuttgarter und Gifhorner Verfahren weisen eine hohe Rückgewinnungsrate auf und erreichen 4 Punkte. Das FIX-Phos Verfahren verfügt über ein mäßiges

Rückgewinnungspotential und das AirPrex® Verfahren schneidet mit der Punktzahl 2 am schlechtesten ab.

Infolge verschiedener Pflanzenversuche konnte nachgewiesen werden, dass die Pflanzenverfügbarkeit bzw. Düngewirkung von MAP-Produkten der von handelsüblichem Düngemittel (TSP) vergleichbar ist und somit im Vergleich zu anderen Rückgewinnungsprodukten die besten Eigenschaften für eine landwirtschaftliche Verwendung aufweisen. Demnach wurden die Produkte aus AirPrex®, Gifhorner und Stuttgarter Verfahren diesbezüglich mit der Höchstpunktzahl 5 bewertet. Die Produkte aus FIX-Phos und Mephrec® hingegen verfügen über eine mäßige Pflanzenverfügbarkeit und erhalten 3 Punkte.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit schneiden die Verfahren AirPrex® und FIX-Phos mit 4,7 Punkten sehr gut ab. Bei beiden Verfahren liegen die Investitionskosten auf einem sehr niedrigen Niveau. Während AirPrex® zudem die geringsten Betriebskosten aufweist, verfügt FIX-Phos über die geringsten produktspezifischen Kosten von 2 €/kg P. Damit ist für das FIX-Phos Verfahren ein wirtschaftlicher Betrieb möglich, da die produktspezifischen Kosten unter dem aktuellen Marktpreis von ca. 2,5 €/kg P liegen. Für das Stuttgarter Verfahren konnten keine genauen Angaben zu den Investitions- und Betriebskosten ermittelt werden. Da der Verfahrensansatz dem Gifhorner Verfahren ähnelt, werden diesbezüglich vergleichbare Kosten angenommen. Aufgrund der geringeren produktspezifischen Kosten, schneidet das Gifhorner Verfahren hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit besser ab, als das Stuttgarter Verfahren. Das Mephrec® Verfahren erzielt für dieses Bewertungskriterium nur 1,3 Punkte, was auf die sehr hohen Investitions- und Betriebskosten zurückzuführen ist. Außerdem zählen die produktspezifischen Kosten, neben die des Stuttgarter Verfahrens, zu den höchsten im Bereich der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm.

Unter dem ökologischen Aspekt schneiden erneut die beiden Verfahren AirPrex® und FIX-Phos mit einer Punktzahl von 4,5 am besten ab, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass keine Abfallstoffe entstehen. Dagegen ist die Entsorgung des behandelten Klärschlammes aus den nasschemischen Verfahren (Gifhorn und Stuttgart) aufwändiger, weswegen im Hinblick auf die Abfallstoffe nur 3 Punkte vergeben wurden. Hinsichtlich der Schwermetallgehalte im Endprodukt können keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren festgestellt werden. Lediglich bei Mephrec® liegt der Gehalt an Arsen, Chrom, Kupfer und Cadmium höher, als bei den anderen Verfahren, weshalb anstatt von 4 Punkten nur 3 vergeben wurden. Insgesamt werden jedoch die Schwermetallgrenzwerte der Düngemittelverordnung bei allen Produkten eingehalten.

Insgesamt erreicht das AirPrex® Verfahren die höchste Punktzahl (20,7) und das beste Endergebnis mit 4,1 Punkten. Es schneidet bei vier der fünf Bewertungskriterien am besten ab. Der einzige Nachteil ist das geringe P-Rückgewinnungspotential. Auch das FIX-Phos Verfahren schneidet mit

einem Endergebnis von 4 Punkten gut ab. Es verfügt über ein höheres Rückgewinnungspotential als AirPrex®, jedoch ist die Pflanzenverfügbarkeit des Produkts schlechter. Der Hauptvorteil liegt jedoch in der wirtschaftlichen Betriebsweise. Das Stuttgarter und Gifhorner Verfahren schneiden mit einem Endergebnis von 3,7 bzw. 3,8 ebenfalls gut ab. Sie verfügen zwar über eine komplexere Verfahrensstruktur und eine geringere Wirtschaftlichkeit, jedoch ist das P-Rückgewinnungspotential relativ hoch und die Pflanzenverfügbarkeit der Produkte sehr gut. Das Mephrec® Verfahren schneidet in der Endbewertung am schlechtesten ab, was im Wesentlichen durch die komplexe Verfahrensweise und dem hohen finanziellen Aufwand begründet ist. Allerdings verfügt es über das höchste P-Rückgewinnungspotential. Zudem sind bei diesem Verfahren erhebliche Einsparungen, bspw. durch Wiederverwendung der Energie, möglich, die zu einer wirtschaftlichen Betriebsweise führen können. Das genaue Ausmaß der Einsparungen konnte jedoch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Ähnlich wie in Kapitel 8.5. aufgezeigt, können für die Einführung eines bestimmten Phosphor-Rückgewinnungsverfahrens in Hessen zuerst Verfahren empfohlen werden, die eine einfache Betriebsweise und Implementierung sowie eine geringes finanzielles Risiko aufweisen. Am besten eignen sich hierfür die Verfahren AirPrex® und FIX-Phos. Aufgrund des geringen finanziellen und bautechnischen Aufwands stellen diese Verfahren insbesondere für kleinere Kläranlagen eine Möglichkeit dar. Besonders das FIX-Phos Verfahren ist aufgrund der wirtschaftlichen Betriebsweise sehr gut für großtechnische Vorhaben geeignet, um Erfahrungswerte zu erhalten.

Wird der Fokus zusätzlich auf ein hohes Rückgewinnungspotential und eine gute Pflanzenverfügbarkeit gelegt, können das Gifhorner und Stuttgarter Verfahren empfohlen werden. Wird der Schwerpunkt auf die höchste P-Rückgewinnungsrate gelegt, ist das Mephrec® Verfahren zu wählen. Auch wenn die Wirtschaftlichkeit als niedrig bewertet wurde, sind wie bereits erwähnt erhebliche Einsparungen möglich.

Als Abschluss bzw. als Überleitung zu Kapitel 10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche findet im folgenden Abschnitt noch ein kurzer Vergleich der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche statt, der Vor- und Nachteile sowie generelle Schwierigkeiten aufzeigt.

9.5. Untersuchung der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche

Infolge des Projekts „Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung“ der TU Darmstadt wurde die Rücklösung von Phosphor aus unterschiedlichen Klärschlämmen und Rückständen thermischer Klärschlammbehandlung über chemische Extraktions- bzw. Löseverfahren und die Rückgewinnung aus der wässrigen Phase mithilfe unterschiedlicher Verfahren untersucht.

Analysiert wurden Klärschlämme unterschiedlicher Zusammensetzung mit unterschiedlichen Phosphor-Bindungsformen, die zuvor mit den vier gängigen Verfahren der Klärschlammstabilisierung (anaerob mesophil, anaerob thermophil, aerob mesophil, aerob thermophil) behandelt wurden. Die Durchführung fand über ein Jahr lang auf dem Versuchsfeld des Instituts IWAR auf dem Klärwerk-Süd in Darmstadt Eberstadt statt. (Petzet, et al., 2010)

Dabei konnte bei keinem der Stabilisierungsverfahren eine vereinfachte Rücklösbarkeit festgestellt werden, noch hatte die Zusammensetzung des Klärschlammes einen signifikanten Einfluss auf die erforderlichen Einsatzmengen an Säure bzw. Base.

Wichtige Erkenntnisse konnte aus dem Vergleich der nasschemischen P-Rücklösung aus Klärschlämmen zu Klärschlammaschen gezogen werden. Bei Klärschlämmen ergeben sich folgende Nachteile: (Petzet, et al., 2010)

- Höherer Chemikalienverbrauch
- Zu behandelnde Volumenströme sind größer
- Simultane Rücklösung von Organik, die Rückbelastungen für die Kläranlage darstellen
- Der Transport der gelaugten Klärschlämme ist weiterhin notwendig

Demzufolge stellt sich die nasschemische Verfahrensweise bei Klärschlammaschen aussichtsreicher dar, als bei Klärschlämmen. Jedoch hat die Zusammensetzung der Aschen Auswirkungen auf den Säurebedarf. Dieser ist umso höher, desto höher der Gehalt an CaO ist. Eine Rücklösung mithilfe von Basen hingegen ist nur bei Klärschlammaschen mit einem niedrigen Gehalt an Calcium bei gleichzeitig hohem Gehalt an Aluminium möglich. Das Rücklösepotential ist bei Basen auf maximal 30 % beschränkt (weswegen das SESAL-Phos-Verfahren entwickelt wurde, siehe Kapitel 10.2.3.). (Petzet, et al., 2010)

Des Weiteren ist eine P-Rücklösung aus Klärschlämmen mit Basen nicht empfehlenswert, da sich bei hohen pH-Werten die Entwässerbarkeit des Schlammes verschlechtert, das Rückgewinnungspotential von P maximal 60 % beträgt und der spezifische Chemikalienverbrauch sehr hoch ist.

Der Nachteil aller säurebasierter Rücklösungsverfahren ist wie bereits erwähnt die Rücklösung von Schwermetallen, die mit zusätzlichen komplexen und aufwändigen Verfahrensschritten vom Eluat getrennt werden müssen. Auch der Versuch einer Nanofiltration zur Trennung von Phosphor und Schwermetalle zeigte keinen besonderen Erfolg. Die hohe Eisen- und Aluminiumkonzentrationen im Eluat reduzierten die Selektivität der Nanofiltrationsmembran bezüglich Phosphor. Aufgrund der hohen Konzentrationen dieser Elemente in allen Klärschlammaschen ist ein ökonomisch wirtschaftlicher Einsatz der Nanofiltration derzeit nicht realisierbar. (Petzet, et al., 2010)

Als Ansatzpunkt nasschemischer Verfahren sind stabilisierte Schlämme gegenüber nicht stabilisierten Überschussschlämmen vorzuziehen. Begründet ist dies auf die höheren Einsatzmengen an Säuren und Laugen sowie die erforderliche Neutralisation der behandelten Schlämme für eine weitere biologische Stabilisierung. (Petzet, et al., 2010)

Getestet wurde auch der Einsatz einer Mikrowellendesintegration, um die Effizienz der Rücklösung zu steigern. Weder für Klärschlämme noch für Klärschlammasche konnte dies bei hohen Temperaturen und Drücken erreicht werden.

Die Untersuchungen bezüglich der Phosphorbindung im Klärschlamm ergaben, dass Phosphor als Calciumphosphate und Struvit (MAP) gebunden sind. Zudem sind die Fällmittel Aluminium und Eisen an der Phosphorbindung beteiligt. Eine Rücklösung des in Struvit und Calciumphosphat gebundenen Phosphors ist unter Einsatz von Säure nicht möglich. Durch die Absenkung des pH-Werts werden offenbar Refixierungsvorgänge ausgelöst, bei denen Stoffe wie z.B. Zeolithe geschädigt werden und somit die Fähigkeit erlangen, Phosphor zu binden. (Petzet, et al., 2010)

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche

Klärschlammasche ist ein inertes und wasserfreies Abfallprodukt aus der thermischen Klärschlammbehandlung. Bevorzugt wird für die Verbrennung des Klärschlammes ein Wirbelschichtreaktor verwendet, um eine feine pulverförmige Flugasche als Endprodukt zu erhalten. In der Asche ist Phosphor chemisch komplex gebunden und liegt in verschiedenen Calciumphosphatverbindungen und je nach Art des eingesetzten Fällmittels in der Abwasserreinigung, als Eisen- und/oder Aluminiumphosphat vor. Die dominierenden Mineralphasen sind dabei Whitlockit, Stanfieldit und Apatit. Da diese Verbindungen keine Wasserlöslichkeit aufweisen, ist keine unmittelbare Pflanzenverfügbarkeit gegeben. (Egle, et al., 2014)

Bei der Rückgewinnung aus Klärschlammasche können fünf verschiedene Verfahrensansätze zur Anwendung kommen: Nasschemische Verfahren (saurer oder basischer Aufschluss), thermische und thermochemische Verfahren, elektrothermische Verfahren, elektrokinetische Verfahren und Bioleaching.

Nasschemische Verfahren

Das nasschemische Verfahren verläuft nach demselben Prinzip wie bei Klärschlämmen. Durch Säurezugabe findet eine Rücklösung des chemisch gebundenen Phosphors statt. Bei einem pH-Wert von 2 kann über 90 % des Phosphors gelöst werden, jedoch gehen dabei auch Schwermetalle und andere Metalle in Lösung, die durch zusätzliche Verfahrensschritte wie Flüssig-Flüssig-Extraktionen, Ionentauscher oder sequentielle Fällungen abgetrennt werden müssen. Als Endprodukt wird ausschließlich Calciumphosphat gewonnen. (Egle, et al., 2014)

Thermische und thermochemische Verfahren

Die thermischen und thermochemischen Verfahren lassen sich in Verfahren mit Behandlungstemperaturen unter dem Ascheschmelzpunkt und in Verfahren mit Temperaturen über dem Ascheschmelzpunkt unterteilen. Die Schmelztemperatur von Asche liegt zwischen 1.150 und 1.250° C. Bei Behandlungstemperaturen unter dem Ascheschmelzpunkt (thermochemische Verfahren) ist das Ziel Phosphor in eine pflanzenverfügbare Form zu überführen und Schwermetalle aus der Asche abzutrennen. Bei Temperaturen von 850 – 1.000° C können leichtflüchtige Metalle durch Zugabe von Chlorid über die Gasphase abgeschieden werden. Grundsätzlich entstehen zwei Stoffströme, die Asche als Feststoff mit niedrigen Schwermetallgehalten sowie hohen P-Konzentrationen und das Rauchgas mit höheren Schwermetallgehalten. Über eine Rauchgasreinigung wird das entstehende Gas gereinigt. (Egle, et al., 2014)

Das thermische Verfahren (über dem Ascheschmelzpunkt) ist vergleichbar mit der Schmelzvergasung, die bereits zu Beginn des 9. Kapitels beschrieben wurde.

Elektrochemische Verfahren

Das Elektrothermische Verfahren kennzeichnet sich durch die Erzeugung von reinem Phosphor (P_4). Hierfür wird Klärschlammasche mit Koks und Kieselsteinen vermengt und in einem Lichtbogenofen auf 1.500°C erhitzt. Es findet eine Reduktion der Phosphate zu reinem P_4 statt, das zusammen mit Staub und Kohlenmonoxid den Ofen gasförmig verlässt. Schwermetalle binden sich größtenteils an Staubpartikel, die über einen Elektrofilter entfernt werden. Nach dem Filter wird das Gas kondensiert und Phosphor kann im Wasser gelagert werden. (Schipper, et al., 2001)

Elektrokinetische Verfahren

Beim elektrokinetischen Verfahren wird mithilfe eines elektrischen Feldes Phosphor aufgrund seiner Eigenschaften als Anion zur Anode hingezogen, reichert sich dort an und kann selektiv gefällt werden. Da die meisten Schwermetalle positiv geladen sind, lagern sich diese an die Kathode an und werden somit vom Phosphor getrennt.

Bioleaching

Das Bioleaching verfolgt das Ziel, Phosphor und Schwermetalle mithilfe von lithotrophen Mikroorganismen aus der Asche rückzulösen. Die Mikroorganismen produzieren Schwefelsäure, die zur Freisetzung des Phosphors und der Schwermetalle führen. Anschließend besteht die Möglichkeit, Phosphor selektiv bakteriell zurück zu gewinnen. (Egle, et al., 2014)

10.1 Aufkommen und Phosphor-Rückgewinnungspotential

Eine wirtschaftliche P-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen (KSA) setzt eine Monoverbrennung voraus, um einen entsprechend hohen Gehalt an Phosphor in der Asche zu gewährleisten (Pinnekamp, 2007).

In Hessen wurden im Jahr 2012 in den beiden Klärschlammmonoverbrennungsanlagen rd. 40.860 t Asche erzeugt. Während bei der SEVA Sindlingen ein mittlerer Phosphorgehalt von ca. 83 kg P/t TS in der Asche festgestellt wurde, lag bei der Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG der mittlere Phosphorgehalt bei ca. 48 kg P/t TS. Bezogen auf die jeweils erzeugte Menge an Klärschlammmonoverbrennungsaschen ergibt sich daraus ein gesamtes Phosphor-Potential von rd. 2.200 t P.

Ein entscheidender Vorteil der P-Rückgewinnung aus der Asche ist, dass das Verfahren, im Gegensatz zur Rückgewinnung aus Klärschlamm und Schlammwasser, nicht an den Kläranlagenstandort gebunden ist. Es ermöglicht somit die Entwicklung eines zentralen Konzepts der Rückgewinnung mit dem ein deutlich größerer Anteil des abwasserbürtigen Phosphors erfasst und behandelt werden kann. Zudem kann die thermische Behandlung gemeinsam mit anderen phosphorhaltigen Abfällen wie z.B. Tiermehl durchgeführt werden. (Egle, et al., 2014)

10.2. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen

10.2.1 LEACHPHOS®

Beim LEACHPHOS® Verfahren handelt es sich um ein nass-chemisches Verfahren, dass von der BSH Umweltservice AG (Schweiz) in Zusammenarbeit mit mehreren Projektpartnern, wie der Baudirektion Kanton Zürich und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, entwickelt wurde (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2012). In 2012 wurde bereits ein industrieller Großversuch in Bern getestet und erfolgreich abgeschlossen. In zwei Monaten wurden sechs Tonnen eines hochwertigen Phosphorprodukts mit einem Phosphatgehalt von rd. 30 – 40 % hergestellt (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013).

Bei dem LEACHPHOS® Verfahren erfolgt zuerst eine Extraktion des gebundenen Phosphors aus der Klärschlammasche mithilfe von Schwefelsäure. Dabei gehen etwa 60 – 90 % des Phosphors in Lösung. Anschließend erfolgt eine Abreicherung von Schwermetallen. Nach einer Aufkonzentration kann das Phosphat in Form eines weißen Salzes ausgefällt werden, das nur noch einen sehr geringen Anteil der ursprünglich in der Klärschlammasche enthaltenen Schwermetallfracht enthält. Aus einer Tonne Klärschlammasche wurden während den Versuchen etwa 50 – 70 kg Phosphor zurückgewonnen. (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013)

Laut den Herstellern ist eine P-Rückgewinnungsrate von über 70 % möglich. (Bühler, et al., 2014)

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche



Abbildung 30 - Schematische Darstellung des LEACHPHOS® Verfahrens (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013)

Topfversuche in Gewächshäusern haben gezeigt, dass das LEACHPHOS® Produkt bei der Mehrheit aller getesteten Boden-Pflanzen-Kombinationen eine ähnliche Düngewirkung wie das konventionelle Superphosphat aufweist. Für eine genauere Abschätzung der Düngewirkung, wurden zudem Feldversuche durchgeführt. Ergebnisse hierzu liegen noch nicht vor. Bezüglich der Schwermetalle können die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für Mineraldünger eingehalten werden. (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013)

Nach dem derzeitigen Stand ist ein wirtschaftlicher Betrieb des Verfahrens noch nicht gegeben. Derzeit wird an Optimierungsmaßnahmen, wie Steigerung der Wertschöpfung des Phosphorprodukts sowie Steigerung der Qualität der abgereicherten Klärschlammasche, gearbeitet. Ergebnisse hierzu werden voraussichtlich Ende 2014 vorliegen. (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013)

Daten bezüglich der Kostenabschätzung seitens der Betreiber konnten nicht ermittelt werden. Für die anschließende Bewertung werden die Daten nach (Egle, et al., 2014) verwendet.

10.2.2. Projekt: PASCH

Das PASCH-Projekt „Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm“ wurde vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen entwickelt. Im Labor- und Technikumsmaßstab wurde ein Verfahren erforscht, das Phosphor durch einen nass-chemischen Aufschluss aus der Klärschlammasche von Monoverbrennungsanlagen zurückgewinnt. Grundsätzlich besteht das Verfahren aus drei Hauptschritten: Chemischer Aufschluss der Aschen durch Laugung, Reinigung der Aufschlusslösung und Fällung des Produkts. (Pinnekamp, et al., 2011)

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche

Zuerst wird die Klärschlammasche zusammen mit verdünnter Salzsäure in einem Rührbehälter bei Umgebungstemperatur vermischt, um das Phosphat in Lösung zu bringen. Die Laugungslösung wird anschließend vom verbliebenden Rückstand getrennt und einem mehrstufigen Solventextraktionsprozess unterzogen, um die mitgelösten Metalle zu entfernen. Die Metalle befinden sich demnach im Extraktionsmittel, welches in einem Nebenprozess gewaschen, reextrahiert und regeneriert wird, so dass ein wiederholter Einsatz möglich ist. Der letzte Verfahrensschritt beinhaltet die Produktfällung aus der Laugungslösung. Im Versuchsbetrieb konnten verschiedene Produkte generiert werden: zwei unterschiedlich zusammengesetzte Calciumphosphate sowie Magnesiumphosphat. (Pinnekamp, et al., 2011)

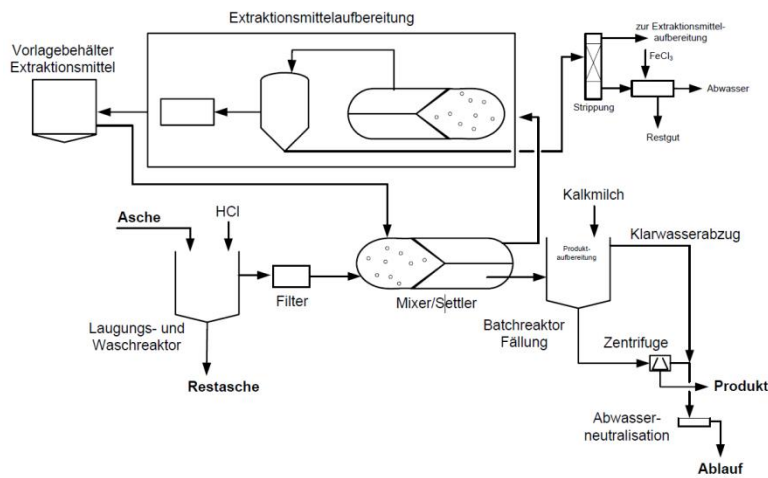


Abbildung 31 - Verfahrensschema PASCH-Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)

Laut Modelberechnungen des „PhoBe“ Abschlussberichts (Pinnekamp, et al., 2011) können bei einer Rückgewinnungsrate von 90 % rd. 1.650 t P/a bzw. 0,56 kg P/(E*a) zurückgewonnen werden. Eine Kostenabschätzung ist folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 31 – Kostenabschätzung PASCH Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)

Anlagenkapazität	30.000 t TS/a
P_{ges}-Konzentration	6,1 % P/TS
P-Rückgewinnungspotential	90 % (theoretisch)
Zurückgewonnene Menge P	1.650 t P/a
Investitionskosten	4.760.000 €
Kapitalkosten	360.000 €/a
Betriebskosten	6.900.000 €/a
Produktspezifische Kosten	4,5 €/kg P
Einwohnerspezifische Kosten	2,50 €/(E*a)

Die Summe der Betriebskosten beläuft sich auf rd. 6,9 Mio. € pro Jahr und beinhaltet Betriebsmittel, Energiebedarf, Entsorgung der Reststoffe, Personal- und Instandhaltungskosten. Die Jahreskosten ergeben sich aus den Kapital- und Betriebskosten und liegen beim PASCH-Verfahren bei ca. 7,25 Mio. €/a. Bei einer rückgewonnenen Phosphormenge von 1.650 Mg P/a belaufen sich die produktspezifischen Kosten auf 4,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten auf ca. 2,5 €/(E*a). Unter Berücksichtigung von Preissteigerungsraten für Reinvestitionen und für Betriebsmittel ergeben sich

Kosten von 5,5 €/kg P bzw. 3,0 €/(E*a). Am stärksten beeinflusst die produktspezifischen Kosten dabei der Preis für Salzsäure, der knapp die Hälfte der Betriebskosten ausmacht. (Pinnekamp, et al., 2011)

10.2.3. SESAL-Phos Verfahren

Das Institut IWAR der Technischen Universität in Darmstadt entwickelte das SESAL-Phos Verfahren (Sequential elution of sewage sludge ash for aluminium and phosphorous recovery). Dieses Verfahren ist eine Weiterentwicklung des SEPHOS Verfahrens und besticht durch einen geringeren Chemikalienverbrauch (Petzet, et al., 2010). Mithilfe einer basischen Elution von Klärschlammaschen wird Phosphor selektiv, also weitgehend ohne Schwermetalle in Lösung überführt und aus dem basischen Eluat als Calciumphosphat gefällt. Bei einer ausschließlich basischen Elution können maximal 30 % des Phosphors aus der Asche zurückgelöst werden. Beim SESAL-Phos Verfahren findet jedoch eine saure Vorelution statt, die den Anteil des basisch rücklösbarer Phosphors auf bis zu 79 % anhebt. Außerdem ist neben der Phosphorrückgewinnung eine Rückgewinnung von Aluminiumfällmittel möglich. (Petzet, et al., 2010)

Das Verfahren basiert auf zwei Elutionsschritten. Zuerst wird die Klärschlammasche mit Salzsäure eluiert, wobei eine Rücklösung von Calcium, Magnesium, Kalium und Schwermetallen erfolgt. Nach Abtrennung der flüssigen Phase wird die Asche bei pH-Wert 13 eluiert, wobei eine Rücklösung von Aluminium und Phosphor erfolgt. Nach Abtrennung der verbleibenden Asche wird Calciumchlorid zur Lösung gegeben, wodurch Calciumphosphat gewonnen wird. Im anfallenden basischen Überstand befindet sich das Aluminium, der bspw. erneut zur Phosphorelimination auf Kläranlagen Verwendung finden kann. Die Restasche wird zusammen mit den ausgefallenen Schwermetallen entsorgt.

Laut den Modelberechnungen des Abschlussberichts „PhoBe“ (Pinnekamp, et al., 2011) wird in der Asche mit einer Phosphorkonzentration von 6,1 % und einem Rückgewinnungsgrad von 63 % gerechnet. Bei einer Anlagengröße mit einem Aschedurchsatz von 30.000 Mg TS/a resultiert daraus eine rückgewinnbare P-Menge von rd. 1.150 Mg P/a bzw. 0,39 kg P/(E*a).

Folgend ist eine Kostenabschätzung für das SESAL-Phos Verfahren aufgeführt.

Tabelle 32 - Kostenabschätzung SESAL-Phos Verfahren (Pinnekamp, et al., 2011)

Anlagenkapazität	30.000 t/a
P_{ges}-Konzentration	6,1 % P TS
P-Rückgewinnungspotential	63 %
Zurückgewonnene Menge P	1.153 t P/a
Investitionskosten	8.690.000 €
Kapitalkosten	600.000 €/a
Betriebskosten	10.190.000 €/a
Produktspezifische Kosten	9,5 €/kg P
Einwohnerspezifische Kosten	3,5 €/(E*a)

Die jährlichen Betriebskosten belaufen sich auf ca. 10,2 Mio. € und werden größtenteils von den Betriebsmitteln Natronlauge (41 % der Betriebskosten), Calciumchlorid (22 % der Betriebskosten) und Salzsäure (10 % der Betriebskosten) bestimmt.

Bei einer rückgewonnenen P-Menge von 1.150 Mg P/a belaufen sich die produktspezifischen Kosten auf 9,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten auf ca. 3,5 €/(E*a). Durch Preissteigerungen für Reinvestitionen und Betriebskosten können Jahreskosten von ca. 14 Mio. €/a entstehen, die zu 12 €/kg P bzw. 5 €/(E*a) führen. (Pinnekamp, et al., 2011)

Unter der Annahme, dass die anfallende Aluminiumlösung zu gleichwertigen Kosten wie handelsübliche Fällungsmittel verkauft werden können, sind jährlich Einsparungen von ca. 2 Mio. € möglich. Umgerechnet auf die produktspezifischen Kosten könnten diese um 2 €/kg P auf 7,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten um 0,5 €/(E*a) auf 3,0 €/(E*a) sinken (ohne Berücksichtigung der Preissteigerung). (Pinnekamp, et al., 2011)

Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass sich das SESAL-Phos Verfahren auf Klärschlammaschen aus Kläranlagen mit Aluminiumfällung beschränkt (Pinnekamp, et al., 2011). Infolge der durchgeführten Befragung der Kläranlagen zu P-Rückgewinnungsverfahren (Kapitel 6.2.2.) wurde festgestellt, dass ca. 40 % der befragten Kläranlagen eine Fällung mit Aluminium betreiben.

10.2.4. ASH DEC®

ASH DEC® ist ein thermochemisches Verfahren, das von der ASH DEC Umwelt AG (Österreich) entwickelt wurde. Zusammen mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, Berlin) arbeitet ASH DEC an der Erforschung, Entwicklung und industriellen Umsetzung des Verfahrens. Eine wesentliche Weiterentwicklung wurde im Rahmen des EU-Projekts SUSAN (Sustainable and Safe Reuse of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery) zwischen 2005 und 2008 erzielt (Hermann, 2009).

Bei dem Verfahren wird zuerst die Klärschlammasche mit Säure und chlorhaltigen Additiven in einem Intensivmischer homogenisiert und pelletiert. Anschließend erfolgt die thermische Behandlung in einem Thermoreaktor bei rund 1.000° C für etwa 30 Minuten. Dabei reagieren bis zu 99 % der Schwermetalle, insbesondere die kritischen Stoffe Blei, Quecksilber, Cadmium Zink und Kupfer, mit den Additiven zu Schwermetallchloriden und verdampfen. Das gebrannte Material wird danach durchmischt und gegebenenfalls mit Phosphor, Kalium und Stickstoff versehen, um eine gewünschte Nährstoffzusammensetzung für das Endprodukt zu erhalten. Ein geringer Anteil der Asche (ca. 2 %) gelangt während des Verbrennungsprozesses in die Abluft und wird über ein mehrstufiges

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche

Rauchgasreinigungssystem zurückgehalten und als verwertbares Metallkonzentrat ausgeschieden. Als letzten Verfahrensschritt erfolgt eine Pelletierung des Produkts, um eine einfache Handhabung des Düngemittels für die Landwirte zu gewährleisten. (ASH DEC Umwelt AG, 2008) (Hermann, 2009)

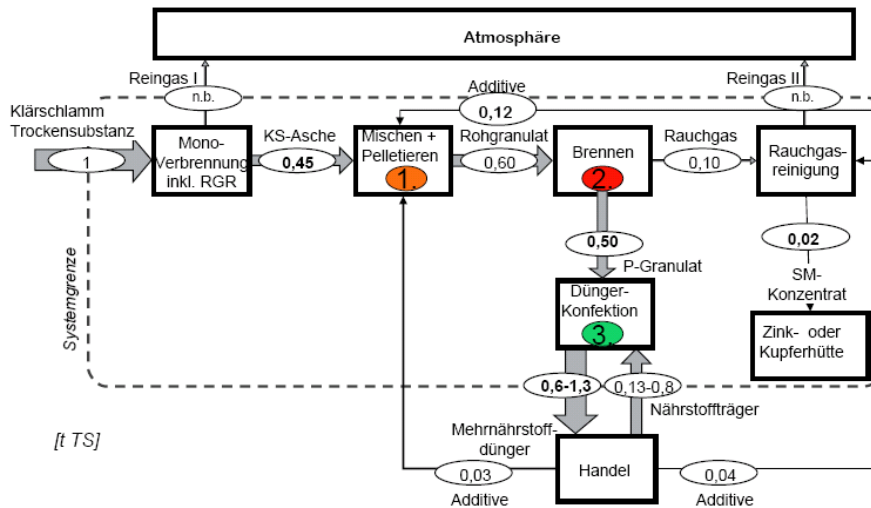


Abbildung 32 - Verfahrensschema ASH DEC® (ASH DEC Umwelt AG, 2008)

Das fertige Endprodukt kann außerdem zu einem Mehrnährstoffdünger aus Magnesium-Calcium-Phosphaten, Kalk, Silikaten und Spurennährstoffe mit dem Namen PhosKraft® weiterverarbeitet werden, der eine gute Pflanzenverfügbarkeit aufweist und die Kriterien der Düngemittelverordnung erfüllt. Die ETH-Zürich führte Pflanzenversuche mit dem Phosphatprodukt PhosKraft® durch, wobei eine vergleichbare Düngewirkung als mit Handelsdünger (Triple Superphosphat) festgestellt wurde. (ASH DEC Umwelt AG, 2008) (Von Horn, et al., 2010)

Die Technologie wurde bereits 2008 im halbtechnischen Maßstab an einer Pilotanlage über einen längeren Zeitraum erfolgreich getestet (Von Horn, et al., 2010). In Koenigs Wusterhausen befindet sich eine großtechnische Umsetzung des Verfahrens (Remy, et al., 2013).

Bei einer Neuanschaffung des ASH DEC® Systems liegen die Investitionskosten für eine Anlage mit einem Durchsatz von 14.000 t Asche/a zwischen 12 und 18 Mio. €. Die Produktionskosten betragen dabei 900 – 1.200 €/t P_2O_5 bzw. 2,0 – 2,75 €/kg P. (Herzel, et al., 2014)

10.2.5. RecoPhos®

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche RecoPhos-Verfahren. Eines wurde von der RecoPhos Consult GmbH in Zusammenarbeit mit Experten der TU Bergakademie Freiberg und der TH Mittelhessen entwickelt und erhielt 2013 den IQ Innovationspreis Mitteldeutschland (Metropolregion Mitteldeutschland Management GmbH). Dieses Verfahren ist sehr einfach gestaltet,

benötigt wenig Energie und es entstehen keine Abfallstoffe. Die Klärschlammasche wird zusammen mit Phosphorsäure und weiteren Zuschlagsstoffen vermischt und umgewälzt. Nach einer bestimmten Zeitspanne wird die Masse granuliert, gesiebt und getrocknet. Eine genauere Erläuterung der Verfahrensschritte konnte jedoch nicht ermittelt werden. Als Endprodukt entsteht der Phosphatdünger „RecoPhos® P38“. (Metropolregion Mitteldeutschland Management GmbH)

Dem Vorteil der sehr einfachen Betriebsweise des Verfahrens liegt der Nachteil der fehlenden Entfrachtung von Schwermetallen gegenüber, die sich vollständig im Endprodukt befinden. (Egle, et al., 2014)

Eine großtechnische Umsetzung wurde bereits erfolgreich getestet (RecoPhos, 2012), zudem soll in Schönebeck an der Elbe Anfang 2015 die erste Anlage dieses RecoPhos® Verfahrens in Betrieb gehen. Das Investitionsvolumen beträgt dabei ca. 12 Mio. €. Geplant ist eine jährliche Produktion von 30.000 t RecoPhos-Dünger. (Geißler, 2013)

Genauere Angaben seitens der Hersteller bezüglich Betriebskosten oder produktspezifische Kosten konnten nicht ermittelt werden.

Das zweite Verfahren mit dem Namen „RecoPhos“ wurde am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben (Österreich) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Projektpartnern, wie der Universität Stuttgart, der SGL Carbon GmbH und Hariri Chemical Process Engineering, entwickelt. Es handelt sich hierbei um einen thermochemischen Prozess, bei dem Phosphor und Schwermetalle unter hohen Temperaturen und reduzierenden Bedingungen aus der Klärschlammasche fraktioniert abgeschieden werden. Die Innovation dieses RecoPhos-Verfahrens liegt in dem Einsatz eines mit Koksschüttung beladenen Induktionsofens (InduCarb). Die Klärschlammasche wird im Ofen auf 1.500° C erhitzt und es erfolgt mithilfe von Kohlenstoff als Reduktionsmittel und Siliziumdioxid eine Reduktion der oxidierten Phosphorverbindungen zu elementarem Phosphor. Die Reduktion des Phosphors findet in einem dünnen Schmelzfilm auf der Oberfläche der Kohlepartikel statt. Dabei verdampft Phosphor, der anschließend entweder als weißer Phosphor oder durch einen zusätzlichen Oxidationsschritt als Phosphorsäure zurückgewonnen werden kann. (RecoPhos - Recovery of Phosphorous)

Auch andere Phosphate, wie AlPO_4 und FePO_4 werden im Reaktor reduziert. Als nutzbare Nebenprodukte entstehen Metalle und eine schwermetallarme Silikatschlacke, die in der Zementindustrie Verwendung finden. Zudem entsteht Kohlenstoffmonoxid, das energetisch genutzt werden kann. (Universität Leoben)

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche

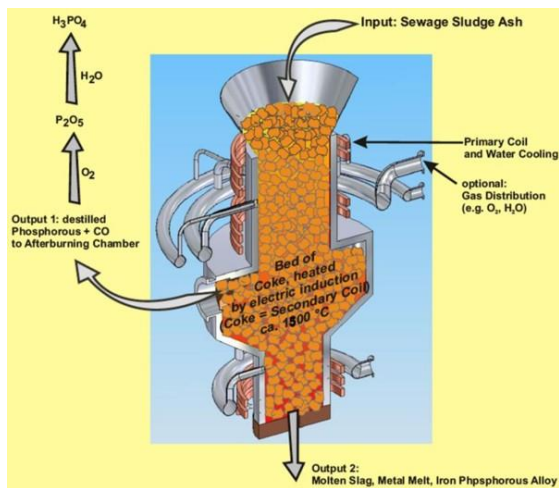


Abbildung 33 - Verfahrensprinzip des InduCarb-Reaktors (Universität Loeben)

Ein weiterer Vorteil ist, dass dieses Verfahren neben Klärschlammasche auch die Behandlung von z.B. Fleisch- und Knochenmehl oder Aschen aus Gießereien ermöglicht. (RecoPhos - Recovery of Phosphorous)

Aufgrund der besseren Datengrundlage des erst genannten RecoPhos[®] Verfahrens der RecoPhos Consult GmbH, wird dieses in die nachfolgende vergleichende Bewertung der Rückgewinnungsverfahren aus der Klärschlammasche aufgenommen.

10.2.6. Nicht bewertete Verfahren (Bioleaching und BioCon)

Bioleaching

Der Begriff „Bioleaching“ beschreibt eigentlich eine Methode im Bergbau, bei der mithilfe von schwefelsäurebildenden Mikroorganismen Metalle (z.B. Kupfer, Zink, Uran, usw.) aus den Gesteinen herausgelöst bzw. gewonnen werden können. Ein neuer Ansatz des Bioleaching ist die Rückgewinnung von Phosphor aus schwermetallkontaminierten Feststoffen. Die incore[®], eine Abteilung der Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG, hat zusammen mit dem Institut für Hygiene und Umweltmedizin der RWTH Aachen ein biotechnologisches Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung mit dem Namen P-bac[®] entwickelt und patentiert. Das Verfahren ermöglicht eine selektive Rückgewinnung aus Klärschlammasche, Schlacken und kontaminierten Böden. Grundsätzlich basiert es auf zwei Verfahrensschritten. Als erstes erfolgt die Herauslösung von Phosphorderivaten und Schwermetalle aus dem Feststoff durch Schwefelsäure, die von Mikroorganismen gebildet wurde. Anschließend findet eine Trennung der Flüssigphase von dem angereicherten Feststoff statt, der zu reduzierten Kosten deponiert werden kann. Der zweite Verfahrensschritt beinhaltet die selektive Trennung des Phosphates von den Schwermetallen durch

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammasche

die vermehrte Phosphataufnahme der Mikroorganismen (vergleichbar mit Bio-P). Die mit Phosphat angereicherte Biomasse wird anschließend von der Flüssigphase getrennt und verarbeitet. Das P-bac® Verfahren ermöglicht somit eine Phosphor-Rückgewinnung von bis zu 90 %. Die Schwermetalle hingegen verbleiben in Lösung und werden chemisch ausgefällt und aufkonzentriert. Als Resultat erhält man ein pulverförmiges Endprodukt mit 30 – 45 % P_2O_5 , das keine pathogenen Mikroorganismen enthält. (Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG)

Das P-bac® Verfahren bietet u.a. folgende Vorteile: (Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG)

- Phosphatlaugung und –Rückgewinnung in einem Verfahrensschritt
- Prozessdurchführung bei niedrigen Temperaturen und atmosphärischem Druck
- Schwefelsäure wird von Mikroorganismen erzeugt
- Schwermetallarmes Endprodukt
- Anwendung auch bei Abwässern möglich

Diese Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase, weswegen die Datengrundlage für eine ausführliche Bewertung nicht ausreichend ist. Da das Verfahren aufgrund der o.g. Vorteile durchaus Zukunftspotential besitzt, sollte die Weiterentwicklung dieser Technologie verfolgt werden.

BioCon

Das **BioCon**-Verfahren wurde in Dänemark entwickelt. Dabei wird die Klärschlammasche gemahlen und mithilfe einer Schwefelsäure aufgeschlossen. Anschließend gelangt die gelöste Phase in ein mehrstufiges System von Ionentauschern, in denen stufenweise Eisenchlorid und Kaliumhydrogensulfat gebildet wird. Die Schwermetalle verbleiben in einem kleinen Stoffstrom, der entsorgt werden muss.

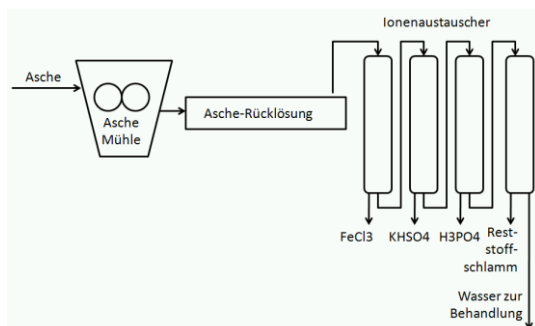


Abbildung 34- Schematische Übersicht des Bio-Con-Verfahrens (Von Horn, et al., 2010)

Die Erprobung dieses Verfahrens verlief in Aalborg in einen halbertechnischen Maßstab (Von Horn, et al., 2010). Die Errichtung einer großtechnischen Anlage in Falun (Schweden) wurde diskutiert, jedoch

nie umgesetzt (Adam, et al., 2010). Da in den letzten Jahren keine Weiterentwicklung des Verfahrens zu beobachten und die Datengrundlage nicht ausreichend ist, kann dieses Verfahren nicht in die nachfolgende Bewertung mit aufgenommen werden.

10.3. Bewertung der Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche

Bei der P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche gilt vorrangig ein pflanzenverfügbares Produkt mit niedrigen Schwermetallkonzentrationen herzustellen. Eine ausführliche Beurteilung der einzelnen Bewertungskriterien wird in den folgenden Abschnitten durchgeführt.

10.3.1. Bewertung der einzelnen Bewertungskriterien

Verfahrensstruktur

Während das ASH DEC[®] und RecoPhos[®] Verfahren bereits großtechnisch umgesetzt wurden, befindet sich das SESAL-Phos Verfahren noch im Labormaßstab. Bei LEACHPHOS[®] fand bereits eine Umsetzung in einer Pilotanlage statt und bei PASCH eine halbtechnische Umsetzung.

Bezüglich des Chemikalienbedarfs bestehen wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren. Während sich bei RecoPhos[®] der Bedarf fast vollständig auf Phosphorsäure beschränkt, ist bei den anderen Verfahren ein zusätzlicher Einsatz von Chemikalien, wie z.B. Natronlauge oder Fällmittel (CaO, CaCl₂, CaOH, CaCO₃) notwendig. Auch bei thermochemischen Verfahren (ASH DEC[®]) werden Chemikalien benötigt, jedoch stellt in diesem Fall der wesentliche Ressourcenbedarf der Verbrauch von Strom und anderer Energieträger wie Gas und Koks dar. (Egle, et al., 2014)

Bezüglich der Betriebsweise weist das RecoPhos[®] Verfahren die geringste Komplexität auf. Hierbei wird die Klärschlammasche lediglich mit Phosphorsäure und weiteren Zuschlagsstoffen vermischt und anschließend zu einem fertigen Produkt granuliert. Die Verfahren LEACHPHOS[®], PASCH und ASH DEC[®] hingegen gestalten sich aufwändiger. Hier sind mehrere Verfahrensschritte notwendig, was u.a. zu größeren bautechnischen Maßnahmen führt. Das SESAL-Phos Verfahren schneidet in diesem Fall am schlechtesten ab, da ein saurer und basischer Aufschluss durchgeführt wird, was auf eine sehr komplexe Betriebsweise schließen lässt. (Egle, et al., 2014)

Da keine genauen Daten zur Implementierung der Verfahren in bestehende Anlagen ermittelt werden konnten, kann dieses Kriterium nicht in die Bewertung mit aufgenommen werden.

Phosphor-Rückgewinnungspotential

Das größte P-Rückgewinnungspotential kann mithilfe des RecoPhos® Verfahrens erreicht werden. Die gesamte P-Fracht der Asche liegt nahezu zu 100 % im anfallenden Endprodukt vor. Das P-Rückgewinnungspotential des ASH DEC® Verfahrens liegt bei 98 – 100 % bezogen auf den P-Gehalt der Klärschlammasche. Bezüglich des Kläranlagenzulaufs ist somit bei beiden Verfahren eine Rückgewinnungsrate von ca. 85 % möglich. Bei den nasschemischen Verfahren LEACHPHOS® und PASCH ist eine theoretische Rückgewinnung von über 90 % erreichbar. Aufgrund von Fest-Flüssig-Trennvorgängen und der Entfernung der Schwermetalle verringert sich das mögliche Rückgewinnungspotential auf 70 bis max. 80 % bezogen auf den P-Gehalt in der Asche. Ein etwas geringeres Potential bietet das SESAL-Phos-Verfahren mit ca. 63 %. (Egle, et al., 2014), (Pinnekamp, et al., 2011)

Produkteigenschaft

Die erzeugten Endprodukte der Rückgewinnungsverfahren sind sehr unterschiedlich in ihrer Form und Charakteristik. Zum Beispiel werden bei nasschemischen Verfahren mit Extraktion ausschließlich Calciumphosphate (CaP) gewonnen, da infolge der thermischen Schlammbehandlung sämtlicher Stickstoff oxidiert wurde und keine MAP-Fällung mehr möglich ist. Beim ASH DEC® Verfahren kann das Endprodukt als eine von Schwermetallen entfrachtete Asche beschrieben werden, die zusätzlich mit Nährstoffen versetzt wird, um sie anschließend als handelsfähigen Dünger (PhosKraft®) auf den Markt zu bringen. (Egle, et al., 2014)

Beim LEACHPHOS® Verfahren hingegen entsteht als Endprodukt ein weißes phosphorhaltiges Salz (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013) und bei RecoPhos® ein braunes Granulat mit einem Durchmesser von 2 – 5 mm, das aus Calcium-, Magnesium-, Aluminium- und Eisenphosphaten sowie diversen Spurenstoffen (z.B. Molybdän, Bor, Kobalt) besteht (reco-phos Consult GmbH, 2011).

Bezüglich der Löslichkeit schneidet das Produkt aus RecoPhos® am besten ab. Es besitzt eine hohe Wasserlöslichkeit (reco-phos Consult GmbH, 2011) und eine sehr gute Löslichkeit im sauren (Zitronensäure) und im alkalischen (Ammoncitrat) Milieu (Egle, et al., 2014). Alle anderen Endprodukte bieten nahezu keine Wasserlöslichkeit. Hingegen liegt die Löslichkeit in Zitronensäure der Produkte von PASCH und SESAL-Phos bei ca. 80 %. Für das Produkt aus LEACHPHOS® wird ein ähnlicher Wert erwartet, jedoch liegen hierfür keine Ergebnisse vor. Am schlechtesten schneidet das Produkt aus dem ASH DEC® Verfahren ab. Die Zitronensäure- und Ammon-Citrat-Löslichkeit liegen bei max. 40 %. Somit ist Löslichkeit nur geringfügig besser als bei einer unbehandelten Asche. (Egle, et al., 2014)

Aus Topf- und Feldversuchen geht hervor, dass die Endprodukte aus ASH DEC® und PASCH sowohl auf basischen als auch auf sauren Böden eine mäßige Düngewirkung aufweisen (Egle, et al., 2014).

Verschiedene Gefäßversuche mit unterschiedlichen Böden (Römer, 2013) ergaben für das ASH DEC® Produkt eine P-Aufnahme der Pflanzen von 20 – 40 %, bezogen auf TSP. Das Produkt aus PASCH erreicht i.d.R. eine P-Aufnahmeeffizienz von 26 – 50 %, vereinzelt wurden auch höhere Raten festgestellt (Römer, 2013). Für das Endprodukt (CaP) des SESAL-Phos-Verfahrens sind nur Daten aus einem Versuch auf einem alkalischen Boden vorhanden. Als Ergebnis wurde eine schlechte Düngewirksamkeit festgestellt (Römer, 2013). Am besten schneiden die Produkte des RecoPhos® (RecoPhos® P38) und des LEACHPHOS® Verfahrens ab, die beide eine mit herkömmlichen Düngemitteln vergleichbare Wirksamkeit erzielen (Egle, et al., 2014), (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2013). Tests der Berliner Humboldt Universität zu Berlin ergaben für RecoPhos® P38 sogar häufig eine bessere Düngewirkung als für den Vergleichsdünger Triple Superphosphat (reco-phos Consult GmbH, 2011).

Im Bezug auf die Wasserlöslichkeit, Pflanzenverfügbarkeit und die Möglichkeit der direkten landwirtschaftlichen Aufbringung schneidet das RecoPhos® Produkt im Vergleich zu allen anderen Produkten am besten ab.

Wirtschaftlichkeit

Die ökonomische Bewertung für das ASH DEC®, LEACHPHOS® und RecoPhos® Verfahren basiert auf den Machbarkeitsstudien der Anlagenbetreiber für einen Aschedurchsatz von 15.000 t/a. Für das PASCH und SESAL-Phos Verfahren liegt eine Kostenrechnung für eine Anlage mit einem Durchsatz von 30.000 t/a vor. Beide Verfahren wurden bisher nur im halbtechnischen Maßstab bzw. Labormaßstab erprobt, weswegen die Bestimmung der Investitionskosten für eine großtechnische Umsetzung mit Unsicherheiten behaftet ist. Die folgende Kostenrechnung basiert auf einer Umsetzung mit einem Durchsatz von 30.000 t/a, um eine vergleichende Darstellung zu gewährleisten. (Egle, et al., 2014)

Beim PASCH und LEACHPHOS® Verfahren liegen die produktspezifischen Kosten im Bereich von 4 – 5 €/kg P und die einwohnerspezifischen Kosten zwischen 2,5 und 3 €/(EW*a). Somit sind die Herstellungskosten für 1 kg sekundär gewonnenem Phosphor derzeit noch doppelt so hoch wie der aktuelle Marktpreis von ca. 2,5 €/kg P (Egle, et al., 2014). Ein Nachteil des LEACHPHOS® Verfahrens sind die sehr hohen Investitionskosten von ca. 20 – 24 Mio. €, die im Vergleich zum PASCH-Verfahren in etwa viermal so hoch sind (Egle, et al., 2014). Hingegen fallen bei PASCH, aufgrund der komplexen Prozesse zur Schwermetallentfrachtung und zur Behandlung der erzeugten Reextraktionsrückstände, höhere Betriebskosten an. Die höchsten produktspezifischen Kosten von ca. 6,5 €/kg P besitzt das SESAL-Phos Verfahren, was auf den Chemikalienbedarf zurückzuführen ist. Trotz der hohen Investitionskosten von 14 – 19 Mio. € schneidet das ASH DEC® Verfahren am besten ab. Die produktspezifischen Kosten liegen dabei zwischen 1,5 und 2,5 €/kg P und die einwohnerspezifischen

Kosten bei 1,1 – 1,3 €/ (EW/a). Das RecoPhos® Verfahren wird im Wesentlichen von den Kosten für die Phosphorsäure bestimmt. Die produktspezifischen Kosten befinden sich mit ca. 2,5 €/kg P auf einem ähnlichen Niveau wie bei ASH DEC®, da der gesamte P-Gehalt, auch jener aus der Phosphorsäure mit berücksichtigt wird. Die einwohnerspezifischen Kosten liegen jedoch bei ca. 6 €/ (EW*a), was auf den hohen Phosphorsäurebedarf zurückzuführen ist. Die Investitionskosten liegen zwischen 7,4 Mio. € (Egle, et al., 2014) und ca. 12 Mio. € (Geißler, 2013). (Egle, et al., 2014)

Da die produktspezifischen Kosten bei ASH DEC® und RecoPhos® dem aktuellen Marktpreis von 2,5 €/kg P entsprechen oder sogar unterbieten, ist bei beiden Verfahren eine wirtschaftliche Betriebsweise gegeben.

Die nasschemischen Verfahren PASCH, RecoPhos® und SESAL-Phos werden in erster Linie von den Betriebskosten und damit den Kosten des Chemikalieneinsatzes dominiert. Im Falle einer Umsetzung auf größeren Anlagen mit höherem Aschedurchsatz sind aufgrund des proportional zunehmenden Chemikalienbedarfs kaum Einsparungen zu erwarten. Desweiteren ist bei den Verfahren LEACHPHOS®, PASCH und SESAL-Phos mit zusätzlichen Kosten für die Entsorgung der Abfallstoffe, wie z.B. der P-armen Asche und der Abwässer, zu rechnen, die einen bedeutenden Kostenfaktor darstellen. Deutlich geringere Entsorgungskosten fallen bei der Entsorgung der Filterstäube beim ASH DEC® Verfahren an. Bei RecoPhos® können die Entsorgungskosten nahezu vernachlässigt werden. (Egle, et al., 2014)

Zu den Betriebskosten der Verfahren LEACHPHOS®, ASH DEC® und RecoPhos® konnten keine genauen Daten ermittelt werden, weswegen hierfür keine Bewertung vorliegt.

Ökologische Bewertung

Im Hinblick auf die Entfernung von Schwermetallen (SM) ist das RecoPhos® Verfahren am schlechtesten zu bewerten, da keine gezielte SM-Entfrachtung stattfindet. Somit ist der SM-Gehalt im Produkt direkt abhängig von dem Gehalt in der Ausgangsasche. Um die Grenzwerte gemäß der DÜMV einzuhalten, ist in diesem Fall eine Verwendung von schwermetallarmen Klärschlamm-/Aschen zu empfehlen. Bei PASCH können mithilfe einer Flüssig-Flüssig-Extraktion die Schwermetalle sowie weitere störende Ionen (z.B. Eisen oder Aluminium) gezielt entfernt werden, sodass nur noch ein geringer Anteil im Endprodukt nachweisbar ist. Das LEACHPHOS® Verfahren besitzt keine gezielte Entfernung der Schwermetalle, jedoch werden bei dem sauren Aufschluss die Schwermetalle nicht im gleichen Maß zurückgelöst und können somit mit der Asche aus dem Prozess entfernt werden. Das Verfahren befindet sich noch in der Erprobungsphase, weshalb noch Veränderungen bei der Prozesskonfiguration möglich sind. Basierend auf den derzeit vorhandenen Daten sind vor allem Kupfer und Zink (600 bzw. 1.500 mg/kg TS) in höheren Konzentrationen im Endprodukt enthalten. Bei SESAL-Phos ist wie bei PASCH eine nahezu vollständige Entfernung der Schwermetalle zu

10. Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche

beobachten. Der Grund hierfür liegt in der basischen Extraktion des Phosphors, da Schwermetalle im alkalischen Bereich nicht bzw. kaum in Lösung gehen. Folglich sind nur sehr geringe Konzentrationen an Schwermetallen im Endprodukt vorhanden. Infolge des thermochemischen Prozesses befinden sich beim ASH DEC® Verfahren die Schwermetalle hauptsächlich in der Gasphase und werden über die Rauchgasreinigung entfernt. Dabei können Cadmium, Kupfer, Blei und Zink sehr gut (> 90 %) entfernt werden, während Arsen, Chrom und Nickel zu höheren Anteilen im Endprodukt enthalten sind. (Egle, et al., 2014)

Tabelle 33 gibt einen Überblick über die Entfrachtung und den Verbleib der Schwermetalle sowie über die anfallenden Reststoffe der einzelnen Verfahren.

Tabelle 33 - Darstellung der Entfrachtung und des Verbleibs der Schwermetalle (Egle, et al., 2014)

Verfahren	Schwermetall-Entfernung	Reststoffe (und deren Behandlung)	Verbleib der Schwermetalle
LEACHPHOS®	teilweise	P-arme Asche und Gips (Reststoffdeponie, Abwasser, Kläranlage)	P-arme Asche, teilweise im Endprodukt
PASCH	nahezu vollständig	feste und flüssige Extraktionsrückstände (Immobilisierung, Ablagerung)	Asche und Extraktionsrückstände
SESAL-Phos	nahezu vollständig	P-arme Asche (Reststoffdeponie)	Asche
Ash Dec®	teilweise	Filterstäube (Untertage oder Recycling)	Filterstäube, entfrachtete Asche
RecoPhos®	keine	keine	vollständig im Endprodukt

Tabelle 34 zeigt zusätzlich die Entfrachtungsleistung der Rückgewinnungsverfahren im Hinblick auf einzelne Schwermetalle. Besonders ASH DEC® und LEACHPHOS® weisen zum Teil erhebliche Unterschiede bezüglich der Entfrachtungsleistung einzelner Schwermetalle auf.

Tabelle 34 - Darstellung der Entfrachtungsleistung hinsichtlich einzelner Schwermetalle (Egle, et al., 2014)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Ash Dec®	Sehr Gut	Gut	Schlecht	Gut	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Gut
LEACHPHOS®	Schlecht	Gut	Gut	Schlecht	Gut	Gut	Gut	Schlecht
PASCH	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht
RecoPhos®	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht
SESAL-Phos	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Schlecht

Sehr Gut	>80 %
Gut	60-80%
Mäßig	41-59%
Schlecht	20-40 %
Fehlend	<20 %
keine Daten	

Insgesamt ist festzustellen, dass v.a. die kritisch diskutierten Schwermetalle wie Cr, Cd und Pb bei fast allen Produkten unter den Gehalten eines herkömmlichen Mineraldüngers liegen. (Egle, et al., 2014)

Ein Nachteil der nasschemischen Verfahrensweise ist die gleichzeitige Erzeugung von Rest- bzw. Abfallstoffen, die sachgerecht entsorgt werden müssen. Hierzu zählt v.a. die saure, phosphatarme Asche. Zusätzlich können je nach Prozessführung andere Reststoffe anfallen, wie z.B. feste und flüssige Reextraktionsrückstände (PASCH) oder Gips aus der Abwasserbehandlung (LEACHPHOS®).

Beim ASH DEC® Verfahren sind Filterstäube die entsorgungspflichtigen Abfallstoffe. Das RecoPhos® Verfahren schneidet in diesem Fall am besten ab, da keine Abfallstoffe anfallen. (Egle, et al., 2014)

10.3.2. Zusammenfassung der Bewertung

Die wesentlichen Bewertungskriterien für P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche sind in Tabelle 35 nochmal zusammengefasst:

Tabelle 35 - Zusammenfassung der Bewertung der Rückgewinnungsverfahren aus Asche (Egle, et al., 2014)

Kriterien	LEACH-PHOS®	PASCH	Sesal-Phos	ASH DEC®	RecoPhos®
Anforderung an Abwasserreinigung	nein	nein	Al-Fällung	nein	nein
Komplexität Anlagentechnik	mäßig	mäßig	hoch	mäßig	sehr einfach
Ressourcenaufwand	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig
Umsetzungsgrad	Pilot-anlage	halb-technisch	Labor-maßstab	groß-technisch	groß-technisch
P-Rückgewinnungspotential bezogen auf Kläranlagenzulauf [%]	~ 70	~ 70	~ 60	~ 85	~ 85
Pflanzenverfügbarkeit/-Wirksamkeit	gut	mäßig	mäßig bis schlecht	mäßig	sehr gut
Schwermetall-Entfrachtung	teilweise	fast vollständig	fast vollständig	teilweise	nein
Verfahrenskosten [€/kg P]	~ 5	~4 – 5	~6	~2	~2
Schwermetallbelastung in Relation zu Handelsdünger	besser	signifikant besser	signifikant besser	besser	ähnlich
Abfallstoffe	ja	ja	ja	ja	nein

Infolge der ausführlichen Bewertung können für das jeweilige Bewertungskriterium die besten Verfahren dargestellt werden (siehe Abbildung 35):

Verfahrensstruktur	•RecoPhos®
P-Rückgewinnungspotential	•RecoPhos® •ASH DEC®
Pflanzenverfügbarkeit	•RecoPhos® •LEACHPHOS®
Wirtschaftlichkeit	•ASH DEC® •RecoPhos®
Ökologische Bewertung	•SESAL-Phos

Abbildung 35 - Darstellung der besten Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche für das jeweilige Bewertungskriterium

Das RecoPhos® Verfahren schneidet bei vier von fünf Bewertungskriterien am besten ab. Nur im Punkt Ökologische Bewertung wurde das SESAL-Phos Verfahren besser bewertet. ASH DEC® schneidet beim P-Rückgewinnungspotential und bei der Wirtschaftlichkeit sehr gut ab, während LEACHPHOS® bezüglich der Pflanzenverfügbarkeit sehr gut bewertet wird.

Eine zusätzliche Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse wird mithilfe eines Punktesystems im folgenden Abschnitt durchgeführt.

10.4. Punktevergabe und Diskussion

Für eine genauere Übersicht der Bewertung der einzelnen Kriterien werden die verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche mithilfe des in Kapitel 7.3. beschriebenen Punktesystems beurteilt. Die Kriterien werden mit Punkten von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) bewertet (Tabelle 36).

Tabelle 36 - Abschließende Beurteilung der P-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlammasche mittels Punktevergabe

		LEACHPHOS®	PASCH	SESAL Phos	ASH DEC®	RecoPhos®
Verfahrensstruktur	Umsetzungsgrad	4	3	2	5	5
	Komplexität	3	3	2	3	5
	Ressourcenaufwand	3	3	3	3	3
	Mittelwert	3,3	3	2,3	3,7	4,3
P-Rückgewinnungspotential	P-Rückgewinnungspotential	<u>4</u>	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>5</u>
Produkt-eigenschaften	Pflanzenverfügbarkeit	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>5</u>
	Wirtschaftlichkeit	Investitionskosten	1	3	2	1
Wirtschaftlichkeit	Produktspez.Kosten	3	3	2	5	4
	Mittelwert	2	3	2	3	3
	Ökologische Bewertung	Schwermetallgehalt	3	5	5	4
Ökologische Bewertung	Abfallstoffe	4	2	4	3	5
	Mittelwert	3,5	3,5	4,5	3,5	3,5
Erreichte Punktzahl (max. 25)		16,8	16,5	13,8	18,2	20,8
Endergebnis*		3,4	3,3	2,8	3,6	4,2

* Berechnung in Relation zu der maximal möglichen Punktzahl 5, wie in Kapitel 8.5. beschrieben

Hinsichtlich der Verfahrensstruktur schneidet das RecoPhos® Verfahren aufgrund der sehr einfachen Betriebsweise und des hohen Umsetzungsgrades am besten ab. Da der Ressourcenbedarf als mäßig eingestuft wird, erhält es für dieses Bewertungskriterium 4,3 Punkte. Das ASH DEC® Verfahren wurde auch schon großtechnisch umgesetzt, jedoch ist die Komplexität höher als bei RecoPhos®. Somit erhält es 3,7 Punkte. Am schlechtesten wird in diesem Fall SESAL-Phos bewertet, da Erprobungen bis jetzt nur im Labormaßstab stattfanden und die Komplexität hoch eingestuft wird. Der Ressourcenaufwand gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Verfahrensweise sehr verschieden. Grundsätzlich ist bei keinem Verfahren weder ein signifikant hoher noch ein deutlich geringerer Aufwand zu verzeichnen, weswegen alle mit der gleichen Punktzahl bewertet wurden.

Bezüglich des P-Rückgewinnungspotentials erzielen die beiden Verfahren ASH DEC® und RecoPhos® die Höchstpunktzahl 5. Bei beiden ist der P-Gehalt der Asche nahezu vollständig im Endprodukt enthalten. Im Vergleich dazu bietet das SESAL-Phos Verfahren mit ca. 60 % das geringste P-Rückgewinnungspotential der untersuchten Verfahren und erzielt somit nur 3 Punkte.

Das Produkt RecoPhos® P38 weist die beste für Pflanzen verfügbare Form und die beste Wasserlöslichkeit auf, weswegen es erneut mit der Höchstpunktzahl 5 bewertet wird. Auch das Produkt aus LEACHPHOS® besitzt eine gute Pflanzenverfügbarkeit, jedoch sind keine Untersuchungen bezüglich der Löslichkeit vorhanden, weswegen das Produkt einen Punkt schlechter bewertet wird. Zum Endprodukt aus SESAL-Phos sind nur wenige Daten bezüglich der Düngewirkung bekannt. Die vorhandenen Daten beziehen sich nur auf Versuche auf alkalischen Böden, wobei eine schlechte Düngewirkung festgestellt wurde. Somit kann das Verfahren nur mit 2 Punkten bewertet werden.

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist bei den Verfahren mit Unsicherheiten behaftet, da die Bezugsquellen aus unterschiedlichen Jahren stammen und keine genauen Daten zu den Betriebskosten für LEACHPHOS®, ASH DEC® und RecoPhos® vorhanden sind. Die Bewertung bezieht sich somit auf die Investitions- und produktspezifischen Kosten. Die Investitionskosten können bei allen Verfahren als hoch eingestuft werden, ausgenommen PASCH, das diesbezüglich die geringsten Kosten aufweist und somit 3 Punkte erzielt. Bei den produktspezifischen Kosten erreicht ASH DEC® die Höchstpunktzahl, gefolgt von RecoPhos®, das 4 Punkte erreicht. Die höchsten produktspezifischen Kosten wurden bei SESAL-Phos festgestellt, somit erhält es 2 Punkte. Insgesamt schneiden im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit die Verfahren PASCH, ASH DEC® und RecoPhos® am besten ab, die jeweils 3 Punkte erzielen. LEACHPHOS® und SESAL-Phos erreichen hier nur 2 Punkte.

Unter dem Aspekt der ökologischen Auswirkungen kann das SESAL-Phos Verfahren mit 4,5 Punkten am besten bewertet werden, da es eine sehr gute Entfernung der Schwermetalle ermöglicht und Abfallstoffe nur im geringen Maße anfallen. Bei PASCH wird eine vergleichbare Schwermetall-Entfrachtung erreicht, jedoch sind die anfallenden Abfallstoffe mengenmäßig höher. Bei RecoPhos® werden keine Abfallstoffe erzeugt, was als sehr positiv bewertet wird. Jedoch ist der größte Nachteil die fehlende Schwermetall-Entfrachtung. Bei ASH DEC® ist eine gute Entfernung von Schwermetallen erkennbar und eine mäßige Erzeugung von Abfallstoffen. Im Vergleich dazu ist bei LEACHPHOS® eine mäßige Schwermetall-Entfrachtung vorhanden, jedoch fallen Abfallstoffe in einem geringeren Maß an.

Insgesamt erzielt das RecoPhos® Verfahren die höchste Punktzahl von 20,8 und das beste Endergebnis mit 4,2 Punkten. Es weist die einfachste Verfahrensstruktur und ein sehr hohes P-Rückgewinnungspotential auf. Zudem besitzt das Endprodukt die beste Pflanzenverfügbarkeit. Als zweitbestes Verfahren schneidet ASH DEC® mit einem Endergebnis von 3,6 Punkten ab, gefolgt von

LEACHPHOS® (3,4) und PASCH (3,3). Das SESAL-Phos Verfahren schneidet nur bei der Ökologischen Bewertung am besten ab. Bei den restlichen Kriterien erreicht es zumeist die niedrigste Punktzahl. Ein zusätzlicher Nachteil des Verfahrens ist, dass nur Klärschlammaschen aus Kläranlagen mit Aluminiumfällung behandelt werden können. Über die Hälfte der in Kapitel 6 befragten Kläranlagenbetreiber führen jedoch eine Fällung mit Eisensalzen durch. Außerdem kann der Einsatz von Aluminiumfällmitteln zu unerwünschten Betriebsproblemen, wie Verschlechterung des Schlammabsetzverhaltens und schlechtere Entwässerbarkeit des Schlamms, führen. (Egle, et al., 2014)

Der finanzielle Aufwand der Einführung eines P-Rückgewinnungsverfahrens aus Klärschlammasche kann bei allen Verfahren als hoch eingestuft werden. Deshalb werden zuerst Verfahren mit niedrigen produktspezifischen Kosten empfohlen, die einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Somit die Verfahren ASH DEC® und RecoPhos® zu empfehlen, die darüberhinaus eine sehr hohe P-Rückgewinnungsrate aufweisen. Außerdem besticht RecoPhos® zusätzlich durch die einfachste Betriebsweise und die höchste Pflanzenverfügbarkeit des Endprodukts.

11. Ausblick

Nicht nur die Abnahme der Phosphorreserven, sondern auch die politischen Vorgaben geben Anlass eine Strategie für den zukünftigen Umgang mit Phosphor zu entwickeln. Eine Novellierung der Klärschlammverordnung ist in Bearbeitung, welche strengere Vorgaben für eine landwirtschaftliche Ausbringung von Klärschlamm vorsieht. Um den Verlust von Klärschlamm als Düngemittel nicht durch die zusätzliche Verwendung von mineralischen Düngemitteln auszugleichen, ist die gezielte Förderung neuer oder bereits bestehender P-Rückgewinnungsverfahren notwendig. Zusätzlich befasst sich die Bundesregierung derzeit mit der Erstellung einer Phosphor-Rückgewinnungsverordnung. Aussagen zu den konkreten Vorgaben sind hierfür noch nicht bekannt.

11.1. Arbeiten der LAGA und Beschlüsse der Umweltministerkonferenz

Mit Vertretern von BMUB, UBA, LABO, LAWA und der Acker- und Pflanzenbaureferenten erarbeitete die LAGA mittels eines Ad-hoc Arbeitskreises einen Abschlussbericht (LAGA - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2012), der die Handlungsoptionen für das weitere Vorgehen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und weiteren Stoffen prüft. Der Bericht „Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven“ des LAGA-Ad hoc Arbeitskreises gibt u.a. folgende Empfehlungen: (Roskosch, et al., 2014)

1. Sofern keine vorherige Rückgewinnung von Phosphor möglich ist, wird keine Mitverbrennung von Klärschlämmen und anderen Abfällen mit hohen P-Gehalten durchgeführt. Mögliche Regelung: Bei Phosphatgehalten der Abfälle von max. 3 – 5 % TM ist eine Mitverbrennung möglich, später bei 1 %.
2. Lagerung der Klärschlammaschen in Langzeitlagern, um eine Rückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführen.
3. Für Matrices mit P-Gehalten über 2 % gilt ein Verdünnungsverbot.
4. Entwicklung einer Förderstrategie sowie weitere Fördermaßnahmen, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
5. Beauftragung neuer Studien zur Düngewirkung und Pflanzenverfügbarkeit aller derzeit verfügbaren sekundär gewonnenen P-Produkte auf der Grundlage vergleichbarer Rahmenbedingungen.

Die Erkenntnisse aus dem Abschlussbericht der LAGA beeinflusste auch die Umweltministerkonferenz (UMK). In ihrer 80. Sitzung im Juni 2013 griff die UMK erneut das Thema Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung auf und erteilte u.a. folgende Beschlüsse:

- Die LAGA wird gebeten, unter der Mitwirkung von LAWA, LABO und der Acker- und Pflanzenbaureferenten eine Bewertung bekannter Verfahren im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Einsatzfähigkeit sowie Ressourcen- und Energieeffizienz durchzuführen. Außerdem sollen eine Bewertung der Düngewirkung, Pflanzenverfügbarkeit und Schadstoffgehalte von sekundär gewonnenem Phosphor im Vergleich zu Rohphosphaten erfolgen sowie eine Darstellung der Anforderungen an die Lagerung von Klärschlammaschen.
- Die Einrichtung einer Phosphor-Plattform sowie einer Phosphor-Informations- und Monitoring-Datenbank wird als sinnvoll erachtet.
- Die LAGA wird gebeten, eine Übersicht über eine Phosphorstrategie zu entwickeln und der UMK im Herbst 2015 darüber zu berichten.

Zur Erreichung der Vorgaben wurde in Frankfurt a. M. die neue LAGA Ad-hoc-AG „Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung“ im November 2013 gegründet. Vertreter der LAGA, LABO, LAWA, BMUB, UBA und der Acker- und Pflanzenbaureferenten arbeiten seitdem an der Umsetzung der Beschlüsse und an einem Vorschlag zur Phosphorstrategie, die bis Ende 2015 fertiggestellt sein soll. Der Vorsitz des LAGA Ad-hoc-Arbeitskreises liegt bei Baden-Württemberg. (Roskosch, et al., 2014)

11.2. Stand der Forschung in Deutschland

Im wissenschaftlich-universitären Umfeld wurden in den letzten Jahren viele Bemühungen getätigt, verschiedene Verfahren zur P-Rückgewinnung zu entwickeln und im Labor- und Technikumsmaßstab umzusetzen, um in naher Zukunft eine großtechnische Umsetzung zu erreichen. Ein Beispiel hierfür ist die 2004 gemeinsam vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gegründete Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe – insbesondere Phosphor“. Ziel dabei ist eine Strategie zur Nutzbarmachung von Pflanzennährstoffen aus unterschiedlichen (Abfall)Stoffströmen, wie z.B. Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammaschen, tierischen Nebenprodukten oder Wirtschaftsdüngern aufzuzeigen. (Roskosch, et al., 2014)

Neben den rein verfahrenstechnischen Forschungsarbeiten befassen sich andere Projekte u.a. mit den Potentialen von Klärschlamm und Klärschlammasche, mit der Entwicklung von Phosphor-Strategien sowie weiteren wichtigen Aspekten zum Thema Phosphor-Rückgewinnung. Folgend einige Beispiele:

- Umweltforschungsplan (UFOPLAN) des BMUB mit dem Titel „Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphor-Rückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz (FKZ 371326301)“. (Roskosch, et al., 2014)
- UFOPLAN der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), der sich mit „Monitoring von Klärschlammasche hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffgewinnungspotentiale (FKZ 371133321)“, beschäftigt. (Roskosch, et al., 2014)
- Projekt „ZwiPhos: Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonoverbrennungsgaschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphor-Rückgewinnung“, koordiniert vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen. (Roskosch, et al., 2014)
- Förderprogramm „r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. (Roskosch, et al., 2014).
- EU-Projekt „P-Rex – Nachhaltiges Klärschlammmanagement zur Förderung des Phosphorreyclings und der Energieeffizienz“, das unter der Leitung des Kompetenzzentrums Wasser Berlin gGmbH (gemeinnützige GmbH) gestartet wurde. Es befasst sich neben der Düngewirkung und der Umweltauswirkungen der Recyclingprodukte, mit der Analyse bestehender Marktbarrieren zur Einführung der P-Rückgewinnung sowie Strategien zur Reduzierung von Hemmnissen. (Roskosch, et al., 2014)

Die Ergebnisse zu den Forschungsarbeiten sollen in verschiedenen Plattformen, wie z.B. der Deutschen Phosphorplattform, zusammengefasst und veröffentlicht werden.

11.3. Projekte und Studien einzelner Bundesländer

Auch in vielen Bundesländern wird bereits aktiv an einer Phosphor-Rückgewinnung gearbeitet:

- Berlin: Laut dem Abfallwirtschaftskonzept 2010 bis 2020 des Landes Berlin liegt der Schwerpunkt auf der Rückgewinnung von MAP und langfristig auch auf einer eigenen Verbrennungsanlage mit integrierter Phosphor-Rückgewinnung. (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt)
- Schleswig-Holstein: Im Juni 2013 wurde eine Studie veröffentlicht, in der Phosphor-Rückgewinnungspotentiale ermittelt und verschiedene Rückgewinnungsverfahren bewertet werden. (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MELUR), 2011)
- Nordrhein-Westfalen: Das Umweltministerium in NRW entwickelt gegenwärtig eine Rückgewinnungs-Strategie, vor allem im Bereich phosphathaltiger Abfälle. Zudem unterstützt NRW ein Forschungsvorhaben an der TU Braunschweig, das sich auf die Phosphat-Rückgewinnung aus Deponien und Altablagerungen spezialisiert hat. (Roskosch, et al., 2014)
- Baden-Württemberg: Im November 2012 wurde eine eigene Strategie zum Thema Phosphor-Rückgewinnung veröffentlicht. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2012)
- Bayern: Eine „Initialstudie Phosphor-Strategie für Bayern – Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen“ wurde im Oktober 2012 verfasst, in der die Phosphor-Potentiale aus Abwasser, Klärschlamm, Tiermehl und Bioabfall ermittelt werden. Zudem erfolgte die Erstellung eines Stoffflussdiagramms für Phosphor und Modellszenarien für eine bayernweite Phosphor-Rückgewinnung. (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2012)

11.4. Förderprogramme

Bei dem Großteil der Rückgewinnungsverfahren ist noch kein wirtschaftlicher Einsatz gegeben. Zudem bestehen noch zu geringe Erfahrungswerte bezüglich großtechnischer Umsetzungen. Daher sollten die Entwicklung und Erprobung von P-Rückgewinnungsverfahren gezielt über verschiedene Förderprogramme unterstützt werden. Ein Beispiel hierfür stellt das Umweltinnovationsprogramm (UIP) dar, das von Bundesumweltministerium, KfW Bank und Umweltbundesamt umgesetzt wird. Es fördert Vorbildprojekte mit Umweltentlastungspotential mit einem Zinszuschuss zur Vergünstigung eines Kredits (bis zu 70 %) oder mit einem Investitionszuschuss (bis zu 30 %) der zuwendungsfähigen Ausgaben. (Roskosch, et al., 2014)

Auch das BMBF bietet Förderinitiativen, bspw. für Vorhaben zu Demonstrationszwecken, an. Eine Übersicht über die aktuell ausgeschriebenen Förderprogramme und Finanzhilfen des Bundes, der Bundesländer und der EU bietet die Förderdatenbank des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014) (Roskosch, et al., 2014)

Ein weiteres Beispiel für Förderinitiativen bietet das Land Baden-Württemberg. Mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kann das Umweltministerium Baden-Württemberg Verfahren zur P-Rückgewinnung unterstützen. Geplant ist die Untersuchung und Entwicklung unterschiedlicher Rückgewinnungsverfahren in Pilotanlagen an verschiedenen Standorten, um daraus Erfahrungswerte für großtechnische Umsetzungen zu erhalten und diese umzusetzen. Die Ergebnisse sollen zeigen, welche Verfahren ein qualitativ hochwertiges und gering belastetes Phosphor-Produkt erzeugen, das als Düngemittel in der Landwirtschaft oder in der Industrie einsetzbar ist. (Roskosch, et al., 2014)

12. Zusammenfassung

Phosphor ist eine lebenswichtige und endliche Ressource. Derzeit wird bundesweit an einer Strategie zum nachhaltigen Umgang und zur Rückführung von Phosphor in den Nährstoffkreislauf gearbeitet. Die Masterarbeit verfolgte daher das Ziel, in Kooperation mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), speziell für Hessen das vorhandene Phosphorpotential in verschiedenen Stoffströmen wie tierische Nebenprodukte, Bioabfälle, Abwasser, Klärschlamm und Klärschlamm- asche aufzuzeigen und den aktuellen Stand der Maßnahmen zur Wertschöpfung bzw. Rückgewinnung von Phosphor zu untersuchen.

Im Bereich Bio- und Grünabfall wurden hierfür Daten aus verschiedenen Studien und Forschungsarbeiten, sowie Abfallwirtschaftsplänen verwendet. Insgesamt kann die Wertschöpfung bezüglich dieses Stoffstroms als hoch eingestuft werden. Im Vergleich mit den anderen Bundesländern liegt Hessen in der Summe der spezifischen Erfassung von Bio- und Grünabfällen über dem bundesweiten Durchschnitt. Trotzdem besteht für eine weitere Verbesserung der Wertschöpfung der wesentliche Handlungsbedarf im Stoffstrom Restmüll, da durchschnittlich immer noch ca. 40 % Bioabfall über den Restmüll entsorgt werden.

Dagegen kann in Hessen die Notwendigkeit einer Strategie zur gezielten Phosphor-Rückgewinnung aus tierischen Nebenprodukten als gering betrachtet werden. Hessen verfügt weder über Tierkörperbeseitigungsanlagen, die beseitigungspflichtige tierische Nebenprodukte der Kategorie 1 und 2 thermisch verwerten, noch über ein hohes Phosphor-Potential, da die Schlachtmengen im bundesweiten Vergleich sehr gering ausfallen.

In den Stoffströmen Abwasser, Klärschlamm und Klärschlamm- asche wurde der aktuelle Stand der Maßnahmen zur Phosphor-Rückgewinnung durch Befragungen von Kläranlagen und Klärschlamm- monoverbrennungsanlagen ermittelt. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass derzeit an keiner Anlage weder ein Phosphor-Rückgewinnungsverfahren in Betrieb, noch in Planung ist. Somit wurde der Schwerpunkt der Arbeit auf die Untersuchung und Bewertung bereits erprobter Phosphor-Rückgewinnungsverfahren gelegt, um für den jeweiligen Stoffstrom die Verfahren mit dem größten Zukunftspotential zu ermitteln. Die Bewertung wurde anhand von fünf Bewertungskriterien wie Verfahrensstruktur, Phosphor-Rückgewinnungspotential, Produkteigenschaft, Wirtschaftlichkeit und ökologische Bewertung durchgeführt und mithilfe eines Punktesystems abschließend konkretisiert und diskutiert. Die Ergebnisse zeigen auf, welche Verfahren unter Berücksichtigung welcher Kriterien am besten abschneiden.

Die erzielten Ergebnisse sollen den politischen Entscheidungsträgern eine Hilfestellung bieten, welche Verfahren für eine Umsetzung in einer langfristigen Phosphor-Strategie geeignet sind.

13. Abschlussdiskussion und Schlussfolgerung

Phosphor ist eine lebenswichtige Ressource, die endlich und nicht substituierbar ist. Nach jetzigem Kenntnisstand werden die bekannten und wirtschaftlich abbaubaren Phosphat-Lagerstätten im nächsten Jahrhundert erschöpft sein. Besonders für Europa ist die Entwicklung einer nachhaltigen Phosphor-Strategie von Bedeutung, da es selbst nahezu keine Phosphorvorkommen besitzt und vollkommen auf Importe angewiesen ist. Der rasante Preisanstieg für Rohphosphat im Jahr 2008 bot einen Einblick in zukünftige Szenarien von Verknappung und politischen Spannungen. Zudem ist neben der Förderung und Verarbeitung von Rohphosphat, auch die Ausbringung von mineralischen Phosphatdüngemitteln, mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden.

Die politischen Entscheidungsträger in Deutschland haben dieses Risiko, aber auch die darin enthaltene Chance, erkannt und arbeiten intensiv an einer Phosphor-Strategie. Neben zahlreichen Forschungsprojekten und Förderungsmaßnahmen werden auf Bundesebene derzeit nicht nur ein Ende der Klärschlammasbringung zu Düngezwecken durch eine Novelle der Klärschlammverordnung diskutiert, sondern auch der Entwurf einer Phosphor-Rückgewinnungsverordnung. Danach soll die Verwertung von kommunalen Klärschlämmen in Mitverbrennungsanlagen nur noch bei vorheriger Abtrennung des Phosphors erlaubt sein. Bei der Verwertung in Monoverbrennungsanlagen sollen die Aschen entweder unmittelbar zu Düngemitteln aufbereitet oder auf separaten Deponieabschnitten gelagert werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt aufzubereiten. Um die strengeren Vorgaben zukünftig einhalten zu können, ist die Entwicklung und Erprobung effizienter und wirtschaftlicher Phosphor-Rückgewinnungsverfahren notwendig.

Neben den Hauptbereichen Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche wurde auch die Wertschöpfung aus anderen phosphorhaltigen Stoffströmen untersucht. Ein bedeutendes Potential weisen diesbezüglich Bioabfälle und tierische Nebenprodukte auf. Die Wertschöpfung im Bereich der Bioabfälle kann in Hessen als hoch bewertet werden. Im Vergleich mit den anderen Bundesländern liegt Hessen in der Summe der spezifischen Erfassung von Bio- und Grünabfällen über dem bundesweiten Durchschnitt. Im Bereich der Erfassung des Bioabfalls privater Haushalte (über die Biotonne) belegt Hessen sogar die bundesweit höchste spezifische Erfassungsquote. Derzeit verfügen noch zwei öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger über kein Angebot einer getrennten Bioabfall-erfassung, jedoch sind nach § 11 Abs. 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ab 01.01.2015 alle Entsorgungsträger gesetzlich verpflichtet, überlassungspflichtige Bioabfälle aus Haushalten getrennt zu sammeln, soweit es für die Erfüllung der Verwertungspflichten erforderlich ist. Somit ist zukünftig mit einer noch höheren Erfassungsquote zu rechnen. Trotz dieser hohen Erfassungsquote der getrennt erfassten Bioabfälle wird bei genauer Betrachtung des Stoffstroms Restmüll deutlich, dass

weiterer Handlungsbedarf besteht. Laut den Ergebnissen von bundesweit durchgeführten Hausmüllanalysen des Witzenhausen-Instituts werden durchschnittlich immer noch ca. 40 % Bioabfall über den Restmüll entsorgt. Für Hessen bedeutet dies eine Menge von rd. 400.000 t Bioabfall mit einem theoretischen Phosphor-Potential von ca. 900 t P_2O_5 , das im Restmüll landet und somit ungenutzt dem Kreislauf verloren geht. Desweiteren ist mit Verlusten infolge von illegaler Entsorgung (z.B. Entsorgung von Gartenabfällen in Wäldern oder Wegseitengräben), Verbrennung von Bioabfällen im privaten Bereich und sonstiger Entsorgungswege (z.B. Kanalisation) zu rechnen. Von dem gesamten im Bio- und Grünabfall vorhandenen Phosphor-Potential von schätzungsweise 4.000 t P_2O_5 werden ca. 2.700 t in den Kreislauf zurückgeführt, während rd. 1.300 t ungenutzt bleiben. Bezüglich der Verwertung von Bio- und Grünabfällen stellen die Kompostierung und die Kaskadennutzung (Vergärung mit anschließender Kompostierung) die wesentlichen Entsorgungswege dar. Hierbei geht der Trend in Richtung Kaskadennutzung, die umweltverträglicher und ressourcenschonender ist. Daneben hat sich die Nutzung von Grünabfällen in Biomasseverbrennungsanlagen zur Erzeugung regenerativer Energien etabliert. Allerdings ist bei diesem Entsorgungsweg von einem P-Verlust auszugehen.

Die Wertschöpfung im Bereich der tierischen Nebenprodukte bezieht sich auf die Phosphor-Rückgewinnung aus der Asche von Tierkörperbeseitigungsanlagen. Allerdings wird in Hessen derzeit keine Tierkörperbeseitigungsanlage, die beseitigungspflichtige tierische Nebenprodukte der Kategorie 1 und 2 thermisch verwertet, betrieben. Es befinden sich zwei größere Betriebe zur Verwertung tierischer Nebenprodukte in Hessen, wobei ein Betrieb tierisches Material der Kategorie 1 und 2 zu Tiermehlen und Tierfetten verarbeitet, und der zweite Betrieb sich auf die Herstellung von Düngemitteln aus Material der Kategorie 2 spezialisiert hat. Somit erfolgt bei beiden Betrieben eine Weiterverarbeitung der tierischen Nebenprodukte, wodurch keine explizite Phosphor-Rückgewinnung erforderlich ist. Zudem beträgt die Schlachtmenge von ca. 70.000 t im Vergleich zur bundesweiten Schlachtmenge von ca. 8 Mio. t nur etwa 1 %. Somit kann die Notwendigkeit einer Strategie zur gezielten Phosphor-Rückgewinnung aus tierischen Nebenprodukten in Hessen derzeit als gering betrachtet werden.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt in der Untersuchung von Phosphor-Rückgewinnungsverfahren im Bereich Abwasser, Klärschlamm, und Klärschlamm-Asche. Um Daten zu aktuellen Umsetzungen oder Vorhaben von Rückgewinnungsverfahren in Hessen zu erhalten, wurde eine Befragung aller Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 10.000 EW und aller Klärschlammmono-verbrennungsanlagen durchgeführt. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass im Bundesland Hessen noch deutliche Defizite bezüglich der Maßnahmen zur Phosphor-Rückgewinnung vorhanden sind.

Weder in den Kläranlagen, noch in den Verbrennungsanlagen sind Phosphor-Rückgewinnungsverfahren in Betrieb oder in Planung. Allerdings beschäftigt sich das Institut IWAR der Technischen Universität Darmstadt mit diesem Thema. Bereits zwei Verfahren, FIX-Phos und SESAL-Phos, wurden an dem Institut entwickelt und erforscht. Während das SESAL-Phos Verfahren nur im Labormaßstab getestet wurde, befindet sich das FIX-Phos Verfahren bereits auf der Kläranlage Hildesheim in einer großtechnischen Umsetzung.

Somit befasst sich der Hauptteil der Arbeit mit der Untersuchung und Bewertung bereits erprobter Phosphor-Rückgewinnungsverfahren, um eine Übersicht zu erarbeiten, welches Verfahren unter Berücksichtigung welches Bewertungskriteriums deutliche Vorteile bietet. Die untersuchten Bewertungskriterien waren hierbei Verfahrensstruktur, Phosphor-Rückgewinnungspotential, Produkteigenschaft, Wirtschaftlichkeit und ökologische Bewertung. Für jeden Stoffstrom (Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche) fand zuerst eine ausführliche Beschreibung der Rückgewinnungsverfahren statt. Es wurden speziell die Verfahren gewählt, die über eine ausreichende Datengrundlage aufgrund von halb- oder großtechnischen Versuchen verfügen und deren zukünftiges Potential als hoch betrachtet wird. Bezüglich der Rückgewinnung aus der flüssigen Phase wurden die Verfahren Ostara PEARL[®], P-RoC, DHV Crystalactor[®] und PRISA untersucht. Im Bereich Klärschlamm fand eine Untersuchung der Verfahren AirPrex[®], Mephrec[®], Stuttgarter Verfahren, Gifhorner Verfahren sowie FIX-Phos statt und im Bereich Klärschlammasche wurden die Verfahren LEACHPHOS[®], ASH DEC[®], PASCH, SESAL-Phos und RecoPhos[®] bewertet.

Die ausführliche Bewertung und Gegenüberstellung verfolgte das Ziel, die jeweiligen Vorteile und Defizite der einzelnen Verfahren aufzuzeigen. Für eine genauere Einschätzung erfolgte abschließend eine zusätzliche Bewertung mithilfe eines Punktesystems. Folgend sind die Verfahren mit dem besten Endergebnis für den jeweiligen Stoffstrom aufgeführt:

Flüssige Phase	Klärschlamm	Klärschlammasche
• PRISA	• AirPrex [®]	• RecoPhos [®]

Abbildung 36 - Verfahren mit der höchsten Gesamtpunktzahl

Zum Vergleich führt Tabelle 37 die besten Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium auf:

Tabelle 37 - Zusammenfassung der führenden Verfahren für das jeweilige Bewertungskriterium

	Flüssige Phase	Klärschlamm	Klärschlammasche
Verfahrensstruktur	P-RoC Ostara PEARL®	FIX-Phos AirPrex®	RecoPhos®
P-Rückgewinnungs- potential	DHV Crystalactor®	Mephrec®	RecoPhos® ASH DEC®
Produkteigenschaft	Ostara PEARL® PRISA	AirPrex® Stuttgarter Verfahren Gifhorner Verfahren	RecoPhos® LEACHPHOS®
Wirtschaftlichkeit	P-RoC	FIX-Phos AirPrex®	RecoPhos® ASH DEC®
Ökologische Bewertung	Sehr gut bei allen Verfahren	FIX-Phos AirPrex®	SESAL-Phos

Zum Bereich Abwasser (flüssige Phase) ist zu erwähnen, dass das PRISA Verfahren die höchste Punktzahl durch die Punktvergabe erzielt, jedoch im Hinblick auf die einzelnen Bewertungskriterien nur bei der Produkteigenschaft am besten abschneidet. Hingegen schneiden die Verfahren P-RoC und Ostara PEARL® jeweils bei zwei Bewertungskriterien am besten ab, weswegen diese beiden Verfahren präferiert werden.

Im Bereich Rückgewinnung aus Klärschlamm erreicht AirPrex® nicht nur die höchste Punktzahl, sondern schneidet bei vier der fünf Bewertungskriterien am besten ab. Das gleiche gilt für das RecoPhos® Verfahren bezüglich des Stoffstroms Klärschlammasche.

Nun sind Überlegungen notwendig, wie die Phosphor-Strategie für Hessen aussehen soll. Es sind Untersuchungen erforderlich, auf welchen Stoffstrom das Hauptaugenmerk einer P-Rückgewinnung gelegt wird. Rückgewinnungsverfahren aus der flüssigen Phase besitzen eine einfache Betriebsweise und sind sehr kostengünstig. Allerdings sind die Rückgewinnungsraten als mäßig einzustufen. Bezüglich dieses Stoffstroms können, wie bereits erwähnt, die Verfahren Ostara PEARL® und P-RoC empfohlen werden. Während Ostara PEARL® bereits großtechnisch umgesetzt wurde und das Endprodukt über eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit verfügt, bietet P-RoC den geringsten finanziellen Aufwand verbunden mit der wirtschaftlichsten Betriebsweise. Da das P-RoC Verfahren das geringste finanzielle Risiko aufweist, kann es insbesondere für Kläranlagen mit einer geringeren Ausbaugröße empfohlen werden, die über kein hohes Finanzvolumen verfügen.

Im Stoffstrom Klärschlamm kann, im Vergleich zur flüssigen Phase, die Komplexität bezüglich der Betriebsweise der Verfahren i.d.R. höher eingestuft werden, jedoch werden höhere Phosphor-Rückgewinnungsraten erreicht. Im Bereich Klärschlamm können erneut Verfahren empfohlen werden, die eine einfache Betriebsweise und Implementierung sowie ein geringes finanzielles Risiko aufweisen. Am besten eignen sich hierfür die Verfahren AirPrex® und FIX-Phos. Besonders FIX-Phos

ist aufgrund der äußerst wirtschaftlichen Betriebsweise für großtechnische Umsetzungen geeignet, aus denen Erfahrungswerte gesammelt und für zukünftige Vorhaben genutzt werden können.

Wird dagegen die Strategie verfolgt, Phosphor aus Klärschlammmonoverbrennungsaschen zurückzugewinnen, erfordert dies hohe Phosphorgehalte in den Klärschlämmen. Somit würde die Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm an Bedeutung verlieren. Verfahren zur Rückgewinnung aus der Asche sind zwar sehr energieaufwändig, jedoch werden hohe Rückgewinnungsraten erzielt. Außerdem sind die Verfahren, im Gegensatz zu den anderen Stoffströmen, nicht nur auf eine einzige Kläranlage beschränkt. Dies ermöglicht die Entwicklung eines zentralen Konzepts der Rückgewinnung mit dem ein deutlich größerer Anteil des abwasserbürtigen Phosphors erfasst und behandelt werden kann. Zudem kann die thermische Behandlung gemeinsam mit anderen phosphorhaltigen Abfällen wie z.B. Tiermehl durchgeführt werden. Am besten sind hierfür die Verfahren RecoPhos® und ASH DEC® geeignet. Beide bieten einen wirtschaftlichen Betrieb mit produktspezifischen Kosten die teilweise unter dem aktuellen Marktpreis von Phosphor liegen. Außerdem weisen die Verfahren eine sehr hohe Phosphor-Rückgewinnungsrate auf. RecoPhos® besticht zusätzlich durch die einfachste Betriebsweise und die höchste Pflanzenverfügbarkeit des Endprodukts.

Derzeit befinden sich in Hessen zwei Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, jedoch geht der Großteil der Klärschlammmasche in den Bergversatz oder wird deponiert. Wird die Strategie der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche verfolgt, sind Maßnahmen zur Implementierung von Rückgewinnungsverfahren erforderlich, die einige Zeit in Anspruch nehmen. Bis dahin könnten die Klärschlammmonoverbrennungsaschen so gelagert werden, dass sie an einem späteren Zeitpunkt für eine Phosphor-Rückgewinnung wieder zur Verfügung stehen.

In den kommenden Jahren muss in Hessen aktiv an großtechnischen Umsetzungen von P-Rückgewinnungsverfahren gearbeitet werden, um die Kreislaufnutzung von Phosphat zu ermöglichen und die zukünftigen politischen Vorgaben erfüllen zu können. Einen Anreiz bieten hierfür die Arbeiten der LAGA und die Beschlüsse der Umweltministerkonferenz, sowie die zahlreichen Förderinitiativen und Finanzhilfen des Bundes, der Bundesländer und der EU. Ein möglicher Ansatz wäre die Einführung von Förder- oder Demonstrationsprojekte an den Kläranlagen, um die Machbarkeit zu verdeutlichen und weitere Erfahrungswerte zu erhalten.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist den Entscheidungsträgern eine Entscheidungshilfe zur Verfügung gestellt worden, um unter Berücksichtigung der eigenen Rahmenbedingungen und der jeweiligen Schwerpunktsetzung (Verfahrensstruktur, Phosphor-Rückgewinnungspotential, usw.), das vorteilhafteste Verfahren auszuwählen. Die Ergebnisse sollen dabei einen Beitrag zur Weiterentwicklung und Umsetzung einer langfristigen Phosphor-Strategie für Hessen leisten.

14. Literaturverzeichnis

Adam, C. und Simon, F.-G. 2010. Phosphorrückgewinnung im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung. *Sitzung des Fachausschusses Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung*. [Online] 07./08.. Oktober 2010. [Zitat vom: 12. August 2014.]

http://www.processnet.org/processnet_media/Vortrag+Adam.pdf.

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich. 2012. Projektblatt Nr. 1: Ohne Phosphor kein Leben. [Online] Juli 2012. [Zitat vom: 11. August 2014.]
http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/abfall/siedlungsabfaelle/klaerschlam.html#title-content-internet-baudirektion-awel-de-abfall_rohstoffe_altlasten-abfall-siedlungsabfaelle-klaerschlam-jcr-content-contentPar-t.

— **2013.** Projektblatt Nr. 2: Da drin steckt viel Leben. [Online] Januar 2013. [Zitat vom: 11. August 2014.]

http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/abfall/siedlungsabfaelle/klaerschlam.html#title-content-internet-baudirektion-awel-de-abfall_rohstoffe_altlasten-abfall-siedlungsabfaelle-klaerschlam-jcr-content-contentPar-t.

— **2013.** Projektblatt Nr. 3: Technische Machbarkeit gesichert. Optimierung gestartet. [Online] September 2013. [Zitat vom: 11. August 2014.]

http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/abfall/siedlungsabfaelle/klaerschlam.html#title-content-internet-baudirektion-awel-de-abfall_rohstoffe_altlasten-abfall-siedlungsabfaelle-klaerschlam-jcr-content-contentPar-t.

ASH DEC Umwelt AG. 2008. P- und Mehrnährstoffdünger aus Klärschlammaschen. [Online] 2008. [Zitat vom: 18. Juli 2014.] http://www.susan.bam.de/pdf-partners/08-04_ashdec_firmen-anlagenpraesentation_de.pdf.

Barjenbruch, M. und Exner, E. 2009. Leitfaden zur Verminderung des Phosphoreintrags aus Kläranlagen. [Online] Juli 2009. [Zitat vom: 25. März 2014.]

<http://www.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1044.pdf>.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. 2012. Initialstudie Phosphorstrategie für Bayern – Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen. [Online] Oktober 2012. [Zitat vom: 27. Juni 2014.]

http://www.stmuv.bayern.de/umwelt/abfallwirtschaft/phosphorrecycling/doc/abschlussbericht_phosphorrecycling.pdf.

Bernhard, C. 2012. Nährstoffgehalt organischer Düngemittel. [Online] 2012. [Zitat vom: 20. April 2014.] <http://www.llh.hessen.de/pflanzenproduktion/duengung-boden/wirtschaftsduenger.html>.

Bever, J., Stein, A. und Teichmann, H. 2002. *Weitergehende Abwasserreinigung*. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2002.

Brett, S., et al. 1997. Centre Européen D'Eudés des Polyphosphates E.V. *Struvite formation in waste-recovery technologies*. London : Selper Publications, 1997. ISBN 0-948411-10-0.

- Bühler, J. und Schlumberger, S. 2014.** Phosphormining aus Klärschlammasche. *Nasschemische Extraktion - LEACHPHOS eine Lösung die funktioniert*. [Online] 21. Januar 2014. [Zitat vom: 28. Juli 2014.]
http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/buehler_bsh_leachphos.pdf.
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. 2005.** BUNDposition Klärschlamm. [Online] Juni 2005. [Zitat vom: 28. Mai 2014.]
http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/sonstiges/20050600_sonstiges_klaerschlam_m_position.pdf.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. 2013.** P-Recycling - Nachhaltiges Phosphormanagement in Europa. [Online] 10. April 2013. [Zitat vom: 12. März 2014.]
<http://www.kompost.de/fileadmin/docs/aktuelles/P-Konferenz.pdf>.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.** Pflanzendüngung. [Online] [Zitat vom: 07. April 2014.]
<http://www.kompost.de/index.php?id=627&L=1%2525252C#c937>.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 1992.** Klärschlammverordnung (AbfklärV) vom 15. April 1992. [Online] 15. April 1992. [Zitat vom: 02. April 2014.]
<http://www.lanuv.nrw.de/agrar/duengemittel/gesetzessammlung/KlaerschlamVO%202009.pdf>.
- **2004.** Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG) vom 25. Januar 2004. [Online] 25. Januar 2004. [Zitat vom: 26. Mai 2014.] <http://www.gesetze-im-internet.de/tiernebg/>.
- **2008.** Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DümV). [Online] 19. Dezember 2008. [Zitat vom: 12. April 2014.]
http://www.lanuv.nrw.de/agrar/duengemittel/gesetzessammlung/DueMV_08%20.pdf. ISSN 0341-1095.
- **2009.** Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27. April 2009. [Online] 27. April 2009. [Zitat vom: 15. Mai 2014.] http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf.
- **1998.** Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) . [Online] 21. September 1998. [Zitat vom: 02. April 2014.] <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bioabfv/gesamt.pdf>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2014.** Förderdatenbank. *Förderprogramme und Finanzhilfen des Bundes, der Länder und der EU*. [Online] 2014. [Zitat vom: 13. September 2014.]
<http://www.foerderdatenbank.de/>.
- CDU Deutschlands; CSU-Landesleitung; SPD. 2013.** Deutschlands Zukunft gestalten. *Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD - 18. Legislaturperiode*. [Online] 14. Dezember 2013. [Zitat vom: 24. Mai 2014.]
<https://www.cdu.de/sites/default/files/media/dokumente/koalitionsvertrag.pdf>.

Dittrich, B. und Klose, R. 2008. Bestimmung und Bewertung von Schwermetallen in Düngemitteln. [Online] Januar 2008. [Zitat vom: 02. April 2014.]
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14898/documents/17816>. ISSN 1861-5988.

Egle, Lukas, Rechberger, Helmut und Zessner, Matthias. 2014. Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser. *Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*. [Online] Februar 2014. [Zitat vom: 22. Juli 2014.]
http://iwr.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-wasserguete/Projekte/Phosphor/Phosphorr%C3%BCckgewinnung_aus_dem_Abwasser_Endbericht_6.3.14.pdf.

Ehbrecht, A., et al. 2014. P-Rückgewinnung durch Kristallisation an Calcium-Silicat-Hydrat-Phasen. *Abwasser-Phosphor-Dünger-Workshop in Berlin*. [Online] 28. Januar 2014. [Zitat vom: 23. Juli 2014.]
http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/schuhmann_kit_proc.pdf.

Ehbrecht, A., et al. 2012. Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwasser mittels Kristallisation. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*. 2012, 05.

Ewert, W. und Wagenbach, A. 2014. AirPrex: MAP-Kristallisation in Verbindung mit Bio-P Fällung. *Workshop "Abwasser - Phosphor - Dünger"*. [Online] 28. Januar 2014. [Zitat vom: 17. Juli 2014.]
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/ewertwagenbach_pcs.pdf.

Ewert, W. 2009. Verfahren zur Optimierung der anaeroben Schlammbehandlung bei Anwedung der biologischen Phosphatelimination. [Online] 2009. [Zitat vom: 17. Juli 2014.] http://www.pcs-consult.de/Optimierung_anaerober_Schlammbehandlung.pdf.

Fischer. 2014. SÜPRO GmbH. s.l. : Telefongespräch, 08. Mai 2014.

Fricke, K. und Bidlingmaier, W. 2003. Phosphatpotenziale qualitativ hochwertiger organischer Siedlungsabfälle. *Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser*. RWTH Aachen, Umweltbundesamt, Berlin : s.n., 2003.

Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG. Wertstoffrückgewinnung. *P-bac®-Verfahren*. [Online] [Zitat vom: 26. August 2014.] <http://www.inocre.de/phosphatrueckgewinnung>.

Gajic, D. 2011. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredelung. *Untersuchungen zur Optimierung der nasschemischen Aufbereitung von Klärschlämmen bei der Phosphorrückgewinnung*. s.l. : Shaker Verlag, 2011.

Gallenkemper, B., et al. 2008. Ressourcen- und Klimaschutz in der Siedlungsabfallwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen - Zukünftige Potenziale und Entwicklungen. [Online] 31. Dezember 2008. [Zitat vom: 18. Juni 2014.]
http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/munlv_klimaschutz_endbericht.pdf.

Geißler, R. 2013. Phosphor-Recycling in Sachsen-Anhalt. [Online] MDR Info, 17. Dezember 2013. [Zitat vom: 08. August 2014.] <http://www.mdr.de/mdr-info/phosphor-recycling100.html>.

- Gethke-Albinus, K. 2012.** Verfahren zur Gewinnung von Sekundärphosphaten aus flüssigen Stoffströmen und deren Einfluss auf die Phosphorbilanz. *Dissertation*. [Online] 25. Mai 2012. [Zitat vom: 25. Juli 2014.] <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2012/4175/pdf/4175.pdf>.
- Göttlicher-Schmidle, Ute. 2014.** Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. *E-Mail*. Wiesbaden : s.n., 2014.
- Grundmann, T. 2014.** Berücksichtigung von mechanisch-biologischen Behandlungstechnologien im Abfallwirtschaftsplan NRW. *Müll und Abfall*. 2014, 5.
- Grünes, J., Xu, A. und Nelles, M. 2014.** Verwertung von Phosphor aus organischen Abfällen und Reststoffen. *Müll und Abfall - Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft*. 2014, 6.
- Hellmann, S., et al. 2011.** Verbundprojekt RECYPHOS: Recycling von Phosphor - Beitrag zur Nachhaltigkeit in der dezentralen Abwasserbehandlung. [Online] 2011. [Zitat vom: 30. Juli 2014.] http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.phosphorrecycling.de%2Findex.php%3Foption%3Dcom_rokdownloads%26view%3Dfile%26task%3Ddownload%26id%3D56%253Arecyphos-recycling-von-phosphor-beitrag-zur-nachhal.
- Hermann, L. 2009.** Umwelt-Wissen. *Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung. Eine Bestandsaufnahme*. Bern : Bundesamt für Umwelt, 2009. 29.
- Hermanussen, O., et al. 2012.** Abschlussbericht - Wissenschaftliche Begleitung der großtechnischen Anwendung der Seaborne-Technologie auf der Kläranlage Gifhorn. *Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen und technisch-wirtschaftliche Bewertung der Verfahrenstechnik*. [Online] September 2012. [Zitat vom: 18. Juli 2014.] http://www.asg-gifhorn.de/docs/abschlussbericht_seaborne_technologie_gifhorn.pdf.
- Herzel, H., Adam, C. und Kabbe, C. 2014.** Thermochemische Verfahren zur Düngemittelgewinnung im EU-Projekt P-REX. *PHOSPHOR FÜR DIE LANDWIRTSCHAFT - Strategien für eine endliche Ressource*. [Online] 11. Juni 2014. [Zitat vom: 01. August 2014.] http://www.atb-potsdam.de/fileadmin/docs/Temporaer/2014_Phosphor/Herzel.pdf.
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2014.** *P-Werte 2006-2012_Kläranlagen*. [excel-Tabelle] 2014.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.). 2013.** Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen. *Lagebericht 2012*. [Online] Juni 2013. [Zitat vom: 20. März 2014.] http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/wasser/abwasser/kommunales_abwasser/Lagebericht_2012.pdf.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2013.** Abfallmengenbilanz 2012. [Online] November 2013. [Zitat vom: 06. April 2014.] https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/abfallmengenbilanz_2012.pdf. ISBN 978-3-89274-362-0.
- Hessisches Statistisches Landesamt. 2012.** Bevölkerungsdichte in Hessen. [Online] 31. Dezember 2012. [Zitat vom: 16. April 2014.] <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/bevoelkerung->

gebiet/landesdaten/bevoelkerung-allgemein/flaeche-bevoelkerung-und-bevoelkerungsdichte/index.html.

Hoffmann, E. und Leicht, M. 2014. Ionentauscher und Elektrodialyse zur P-Rückgewinnung aus Abwässern - PHOSIEDI-Verfahren. *Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie*. [Online] 28. Januar 2014. [Zitat vom: 30. Juli 2014.] http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/hoffmann_kit_phosiedi.pdf.

indexmundi. 2014. Rohphosphat monatlicher Preis - Euro pro Tonne. [Online] Februar 2014. [Zitat vom: 19. März 2014.] <http://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=rohphosphat&monate=120&wahrung=eur>.

—. **2014.** Weizen monatlicher Preis - Euro pro Tonne. [Online] Februar 2014. [Zitat vom: 26. März 2014.] <http://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=weizen&monate=120&wahrung=eur>.

Johannes Pinnekamp, David Montag, Katrin Gethke, Sandra Goebel, Heinrich Herbst. 2007. Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers "Magnesiumammoniumphosphat - MAP" aus Abwasser und Klärschlamm. [Online] September 2007. [Zitat vom: 12. Juni 2014.] <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3256.pdf>.

Johannes Pinnekamp, Karlheinz Weinfurtner, Christian Sartorius, Stefan Gäth. 2011. Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland. [Online] November 2011. [Zitat vom: 12. Juni 2014.] http://www.phosphorrecycling.de/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=16&Itemid=39&lang=de.

K. Mudrak, S. Kunst. 2010. *Biologie der Abwasserreinigung*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2010.

Kern, M. und Raussen, T. 2009. Optimierte stoffliche und energetische Bioabfallverwertung. *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IV. Stofflich - energetisch*. [Online] 2009. [Zitat vom: 03. Juli 2014.] http://www.abfallforum.de/downloads/ks21_kern_raussen.pdf.

Kill, Paul. 2014. Zweckverband Tierkörperbeseitigung Rheinland-Pfalz. *E-Mail*. 2014.

KIT - Karlsruher Institut für Technologie. 2013. Phosphorrückgewinnung aus Abwasser (ProPhos). *Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Rückständen thermischer Klärschlamm. ProPhos – Teilprojekt 2: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser – Kristallisation im Pilotmaßstab*. [Online] 09. Januar 2013. [Zitat vom: 22. Juli 2014.] http://www.cmm.kit.edu/297_325.php.

LAGA - Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Abfall. 2012. Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven. [Online] 30. Januar 2012. [Zitat vom: 14. März 2014.] http://www.laga-online.de/servlet/is/23875/Bericht_Phosphorr%C3%BCckgewinnung.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht_Phosphorr%C3%BCckgewinnung.pdf.

Langenohl, T., Heck, A. und Könemann, R. 2012. Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. [Online] 2012. [Zitat vom: 29. Mai 2014.] http://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_WAW/mj/KA_03-2012_KS-Grenzwerte.pdf.

Lautenschläger, S. 2014. Phosphor-Rückgewinnung aus tierischen Nebenprodukten. *E-Mail*. Regierungspräsidium Darmstadt - Veterinärwesen : s.n., 2014.

Lederer, J. und Rechberger, H. 2010. Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options. *Waste Management*. 2010, Bd. 30, 06.

Liberti, L., Petruzelli, D. und De Florio, L. 12. - 13. März 2001. Second international conference on recovery of phosphates from sewage and animal waste. *REM NUT ion exchange plus struvite precipitation process*. Noordwijkerhout, Niederlande : s.n., 12. - 13. März 2001.

Löhde, K. 2014. Phosphor aus Klärschlamm - Neue Perspektiven für die Klärschlammbehandlung. *IFAT Special*. [Online] 22. Mai 2014. [Zitat vom: 09. August 2014.] http://www.pyreg.de/website/resources/documents/ifat-artikel-wlb_phosphor-aus-klärschlamm.pdf.

LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. 2010. Bio- und Grünabfälle - Optimierung der Erfassung und Verwertung von Bio- und Grünabfällen in Baden-Württemberg. [Online] Mai 2010. [Zitat vom: 02. Juli 2014.] http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/66390/bio_und_gruenabfaelle.pdf?command=downloadContent&filename=bio_und_gruenabfaelle.pdf. ISBN 978-3-88251-348-6.

M. Kern, T. Raussen, T. Graven, C.-G. Bergs, C.-A. Radde. 2012. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. [Online] März 2012. [Zitat vom: 08. Juli 2014.] http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/Bioabfaelle_2012_de_bf.pdf#page=13&zoom=auto,0,842.

Maier, J. und Scheffknecht, G. 2007. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. *Systematische Untersuchung zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm unter besonderer Berücksichtigung von Feuerungsparametern*. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart : s.n., 2007.

Marc Böhler, Hansruedi Siegrist. 2008. Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen. [Online] Mai 2008. [Zitat vom: 23. April 2014.] http://www.flussgebiete.hessen.de/imperia/md/content/internet/wrrl/2_umsetzung/hintergrundinformationen/m_glichkeiten_zur_optimierung_der_chemischen_phosphorf_llung_an_hessischen_kl_ranlagen.pdf.

Maurer, A. 2014. Phosphor - ein lebenswichtiges Element. Frankfurt am Main : DECHEMA-Kolloquium, 2014.

Metropolregion Mitteldeutschland Management GmbH. RecoPhos Consult GmbH. [Online] [Zitat vom: 08. August 2014.] <http://www.mitteldeutschland.com/wim/mitglieder/recophos-consult-gmbh.html>.

- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MELUR). 2011.** Studie zur Ermittlung von Phosphorrückgewinnungspotenzialen in Schleswig-Holstein. [Online] 2011. [Zitat vom: 27. Juni 2014.] http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/Abfall/05_Siedlungsabfaelle/005_VerwertungDuenger_Klaerschlam/001_StudiePhosphorrueckgewinnung/PDF/Studie__blob=publicationFile.pdf.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. 2014.** Entwurf des Abfallwirtschaftsplans Nordrhein-Westfalen, Teilplan Siedlungsabfälle. [Online] 12. März 2014. [Zitat vom: 23. Juni 2014.] http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/abfallwirtschaftsplan_nrw_entwurf.pdf.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. 2013.** Abfallbilanz 2012. [Online] Juli 2013. [Zitat vom: 30. Mai 2014.] http://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Abfallbilanz_2012_1_.pdf.
- . **2012.** Phosphor-Rückgewinnungsstrategie Baden-Württemberg. [Online] Oktober 2012. [Zitat vom: 27. Juni 2014.] http://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Phosphor-Rueckgewinnungsstrategie_BW.pdf.
- Montag, D. 2008.** Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung - Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. *Dissertation*. [Online] 22. Februar 2008. [Zitat vom: 30. Juli 2014.] http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2298/pdf/Montag_David.pdf.
- N.V. Slibverwerking Noord-Brabant.** Phosphate (Recycling). [Online] [Zitat vom: 17. März 2014.] <http://www.phosphaterecovery.com/the-phosphate-issue/27>.
- Niehörster, K. 2013.** Problemlöser Klärschlamm: Drohende Phosphor-Knappheit kann durch Rückgewinnung aus Abwasser vermieden werden. *Entsorga*. 2013, 5 - 6.
- Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.** Pearl® 2000 - Nutrient Recovery Process. [Online] [Zitat vom: 25. Juli 2014.] http://www.ostara.com/sites/default/files/pdfs/E-Pearl2000_brochure.pdf.
- PETA Deutschland e.V.** Fleischessen bedeutet Hunger für die Welt. [Online] [Zitat vom: 03. April 2014.] <http://www.peta.de/fleischessen-bedeutet-hunger-fuer-die-welt>.
- Petzet, S. und Cornel, P. 2010.** Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen, Teilprojekt B Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammaschen. [Online] November 2010. [Zitat vom: 10. Juli 2014.] <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/659542404.pdf>.
- Pinnekamp, J. 2013.** P-Rückgewinnung: Technisch möglich - wirtschaftlich sinnvoll? *BMU/UBA-Tagung, Bonn*. [Online] 09. Oktober 2013. [Zitat vom: 10. Juli 2014.] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/p-rueckgewinnung-technisch_moeglich.pdf.

- . **2007.** Thermische Klärschlamm Entsorgung in Deutschland sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Asche. *Forschungsvorhaben: "Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw. landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus Abwasser und Klärschlamm"*. [Online] 31. Mai 2007. [Zitat vom: 21. Juli 2014.] http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht%20Teil%20B_Phosphor.pdf.
- Pinnekamp, J., et al. 2011.** Phosphorrecycling - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland (PhoBe). *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*. [Online] November 2011. [Zitat vom: 14. Juli 2014.] http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/02WA0807_-_Abschlussbericht.pdf.
- Pollution Control Service GmbH (P.C.S.). 2010.** AirPrex MAP-Verfahren. [Online] 28. September 2010. [Zitat vom: 17. Juli 2014.] <http://www.pcs-consult.de/html/airprex2.html>.
- . **2010.** AirPrex MAP-Verfahren. [Online] 28. September 2010. [Zitat vom: 17. Juli 2014.] <http://www.pcs-consult.de/html/airprex3.html>.
- Preyl, V. 2012.** Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart. [Online] 16. März 2012. [Zitat vom: 17. Juli 2014.] http://www.iswa.uni-stuttgart.de/lsww/forschung/awt/2012_2013_Forschungsprojekte/Pilotanlage_MAP.html.
- PYREG GmbH.** Das innovative PYREG-Verfahren. [Online] [Zitat vom: 09. August 2014.] <http://www.pyreg.de/technologie.html>.
- RecoPhos - Recovery of Phosphorous.** ReoPhos Factsheet. [Online] [Zitat vom: 09. August 2014.] http://www.recophos.org/c/mid,1364,Media_Centre/.
- reco-phos Consult GmbH. 2011.** RecoPhos® P38. *Geprüfter Qualitätsdünger*. [Online] 2011. [Zitat vom: 28. August 2014.] <http://www.recophos.de/index.php?id=5>.
- . **2011.** RecoPhos® P38. *Technische Daten*. [Online] 2011. [Zitat vom: 28. August 2014.] <http://www.recophos.de/index.php?id=17>.
- RecoPhos. 2012.** Ein innovatives Konzept zur Klärschlammverwertung. *Präsentation Ostdeutsches Rohstoffsymposium*. [Online] 13. November 2012. [Zitat vom: 25. August 2014.] http://www.halle.ihk.de/linkableblob/halikh24/produktmarken/innovation/Jahresthema_2012/Ostdeutsches_Rohstoffsymposium/2149190/.3./data/Vortrag_RecoPhos-data.pdf.
- Remy, C. und Kabbe, C. 2013.** Übersicht der Umsetzung von Verfahren in Europa - Erfahrungen aus P-REX. [Online] 09. Oktober 2013. [Zitat vom: 20. August 2014.] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/uebersicht_der_umsetzung_von_verfahren_in_europa_-_erfahrungen_aus_p-rex.pdf.
- Reuvers, J. 2014.** Chemischer Aufschluss von mineralischen Phosphaten zur Düngemittelherstellung. Frankfurt am Main : DECHEMA-Kolloquium, 2014.
- Römer, W. 2013.** Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*. 2013, 3.

- Roskosch, A., et al. 2014.** Phosphor-Rückgewinnung - Aktuelle technische und politische Entwicklungen. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*. 2014, Nr. 5.
- Royal HaskoningDHV. 2014.** Crystalactor®. [Online] 2014. [Zitat vom: 27. Juli 2014.] <http://www.royalhaskoningdhv.com/en-gb/markets/crystalactor>.
- Rümmele, K. 2011.** Phosphor-Recycling macht Fortschritte. *Wegweisendes Umweltprojekt in Bayern: technisch-wissenschaftliche Koordination am KIT – Pilotanlage geht in Betrieb*. [Online] 10.. Mai 2011. [Zitat vom: 22. Juli 2014.] http://www.kit.edu/kit/pi_2011_6792.php.
- Schaum, C. und Cornel, P. 2012.** Klärschlamm: Phosphorressource der Zukunft? *BWK-Bundeskongress 2012*. [Online] 20.-22. September 2012. [Zitat vom: 10. Juni 2014.] <http://www.bwk-bund.de/fileadmin/Dokumente/Veranstaltungen/Kongresse/2012/BWK-FF-1-Schaum-Kl%E4rschlamm.pdf>.
- Scheidig, K. 2009.** Abschlussbericht - Metallurgisches Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels aus Abfällen. [Online] 29. Mai 2009. [Zitat vom: 05. August 2014.] <https://www.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-24557.pdf>.
- Schipper, K., et al. 2001.** Phosphate recycling in the phosphorous industry. *Environmental Technology*. 2001, Bd. 22, 11.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt.** Abfallwirtschaftskonzept des Landes Berlin. [Online] [Zitat vom: 27. Juni 2014.] http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/konzept_berlin/.
- Stadtwerke Offenbach Holding. 2014.** Einführungsphase Biotonne abgeschlossen - Offenbach zieht Bilanz. [Online] 03. Juli 2014. [Zitat vom: 08. Juli 2014.] <http://www.offenbach.de/stadtwerke-offenbach-holding/holding/gesellschaften/eso-stadt-service/muellabfuhr/bioabfall/article/biotonne-offenbach-zieht-bilanz.html>.
- Statistisches Bundesamt. 2014.** Geschlachtete Tiere, Schlachtmenge: Bundesländer, Jahre, Tierarten, Schlachtungsart. [Online] 07. Mai 2014. [Zitat vom: 07. Mai 2014.] https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;jsessionid=6941E7DAF0F986F3DC991B70FB958FF9.tomcat_GO_1_1?operation=previous&levelindex=3&levelid=1410186925799&step=3.
- Steinmetz, H. und Meyer, C. 2014.** Stuttgarter Verfahren, Saures Leaching aus Klärschlamm. *Workshop "Abwasser - Phosphor - Dünger"*. [Online] 28. Januar 2014. [Zitat vom: 17. Juli 2014.] http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/abstracts_workshop_abwasser-phosphor-duenger_28_29_jan_2014.pdf.
- STN - Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH.** Dienstleister zur Sicherung des Gesundheits- und Umweltschutzes. *Verarbeitung tierischer Nebenprodukte*. [Online] [Zitat vom: 07. Mai 2014.] <http://www.stn-vvtn.de/technik.php>.
- . Dienstleister zur Sicherung des Gesundheits- und Umweltschutzes. *Verarbeitung tierischer Nebenprodukte*. [Online] [Zitat vom: 07. Mai 2014.] <http://www.stn-vvtn.de/produkte.php>.

—. Dienstleister zur Sicherung des Gesundheits- und Umweltschutzes. *Verarbeitung tierischer Nebenprodukte*. [Online] [Zitat vom: 07. Mai 2014.] http://www.stn-vvtn.de/fakten_zahlen.php.

Stössel, E. 2014. *Besichtigung der Versuchsanlage der Chemischen Fabrik Budenheim KG*. 14. August 2014.

TAE GmbH & Co. KG. 2014. Daten zu Verarbeitung tierischer Nebenprodukte. *Telefongespräch*. 07. Mai 2014.

The European Sustainable Phosphorus Platform. 2013. A phosphorous crisis effects us all. [Online] 27. Juni 2013. [Zitat vom: 21. März 2014.] <http://www.phosphorusplatform.eu/p-facts/p-fact-4.html>.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 2009. Einsatz von Fleischknochenmehl, Knochenmehl und Fleischmehl als Düngemittel im Pflanzenbau. [Online] November 2009. [Zitat vom: 06. Mai 2014.] <http://www.tll.de/ainfo/pdf/mehl1109.pdf>.

U.S. Geological Survey. 2014. Mineral Commodity Summaries. [Online] Februar 2014. [Zitat vom: 20. März 2014.] http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2014-phosp.pdf.

Umweltinstitut München e.V. 2012. Tickende Zeitbombe: Uran im Dünger. [Online] März 2012. [Zitat vom: 04. April 2014.] <http://www.umweltinstitut.org/themen/radioaktivitaet/radioaktivitaet-und-gesundheit/natuerliche-radioaktivitaet/uran-im-duenger.html>.

—. **2012.** Uranmessungen Dünger und Spülmittel. [Online] August 2012. [Zitat vom: 04. April 2014.] <http://www.umweltinstitut.org/themen/radioaktivitaet/messungen/uranmessungen-duenger-und-spuelmittel.html>.

Universität Loeben. RecoPhos. *Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik der Universität Loeben, Österreich*. [Online] [Zitat vom: 08. August 2014.] <http://tpt.unileoben.ac.at/de/forschung-hochtemperatur-prozesstechnik-recophos/>.

Van de Velden, M., et al. 2008. The distribution of heavy metals during fluidized bed combustion of sludge (FBSC). *Journal of Hazard Mater.* 2008, Bd. 151, 1.

Verband zur Qualitätssicherung von Düngung und Substraten e.V. 2013. VQSD: Noch weiter Weg bis zu flächendeckender Phosphorrückgewinnung. [Online] Dezember 2013. [Zitat vom: 29. Mai 2014.] http://www.vqsd.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Pressespiegel/EuwidWA50_13_VQSD_zu_KoAV.pdf.

Verein Deutscher Ingenieure. 2006. VDI 3475 Blatt 3. *Emissionsminderung - Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen*. 2006.

—. **2003.** VDI-Richtlinie 3475 Blatt 1. *Emissionsminderung Biologische Abfallbehandlungsanlagen - Kompostierung und Vergärung - Anlagenkapazität mehr als ca. 6.000 Mg/a*. 2003.

Von Horn, J., Sartorius, C. und Tettenborn, F. 2010. Technologievorschau für Phosphorrecyclingtechnologien (Arbeitspaket 6). [Online] Juli 2010. [Zitat vom: 29. Juli 2014.]

http://www.phosphorrecycling.de/attachments/041_Bericht_AP6_Technologievorausschau_2010-08-10.pdf.

Wasser Wissen - Das Internetprotal für Wasser und Abwasser. Eutrophierung. [Online] Institut für Umweltverfahrenstechnik - Universität Bremen. [Zitat vom: 27. März 2014.] <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/e/eutrophierung.htm>.

White, S. und Cordell, D. 2008. Peak Phosphorous: the sequel to Peak Oil. [Online] 2008. [Zitat vom: 13. April 2014.] <http://phosphorusfutures.net/peak-phosphorus.html>.

Wiemer, K., Kern, M. und Raussen, T. 2014. *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IX - stofflich, energetisch*. Witzenhausen : Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2014. ISBN 3-928673-66-1.

Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH. Januar 2013. *Aktualisierung (2012) von Daten zur Studie: "Optimierung der biologischen Abfallbehandlung in Hessen (2007)"*. [pdf] Witzenhausen : Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Januar 2013.

—. **2008.** Optimierung der biologischen Abfallbehandlung in Hessen. [Online] März 2008. [Zitat vom: 28. April 2014.] http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/abfall/Abfallbehandlung_Hessen.pdf.

Wolff, Reinhard. 2008. Der Ostsee geht die Luft aus. [Online] taz.de, 14. November 2008. [Zitat vom: 15. März 2014.] <http://www.taz.de/!25834/>.

15. Anhang

Fragebogen für Kläranlagen

1. Allgemein

Alle einzutragenden Werte bitte für das Jahr 2012 angeben!

Name, Adresse und Betreiber der Kläranlage	
Größenklasse der KA	
Ausbaugröße (Q_{\max} [l/s])	
Einwohnerwerte [EW]	
Jahresabwassermenge [m^3/a]	
Jahresschmutzwassermenge [m^3/a]	
Reinigungsverfahren	
Schlammaufkommen pro Jahr [t/a]	
TS-Gehalt des zu entsorgenden Schlammes [%]	
Kosten der Schlamm entwässerung [€]	
Art des Verfahrens zur Schlamm entwässerung (z.B. Kammerfilterpresse)	
Art der Schlamm entsorgung	
Schlamm-Entsorgungskosten pro Jahr [€]	

2. Fragen zum Bereich Abwasser

Alle einzutragenden Werte bitte für das Jahr 2012 angeben!

2.1. Welche Werte bezüglich Phosphor werden im Zulauf und nach der Vorklärung gemessen (P_{ges} in mg/l)?

	24h -Probe		
	Mittelwert	50-Percentil Wert	90-Percentil Wert
Zulauf zur Kläranlage - P_{ges} in mg/l			
Nach der Vorklärung - P_{ges} in mg/l			

2.2. Welche Ablaufwerte im Hinblick auf Phosphor werden erreicht?

	2h-Probe (falls vorhanden)			24h-Probe		
	Mittelwert	50- Percentil Wert	90- Percentil Wert	Mittelwert	50- Percentil Wert	90- Percentil Wert
Ablaufwerte - P_{ges} in mg/l						

2.3. Wie hoch ist die Jahresfracht an P_{ges} , die in den Vorfluter eingeleitet wird?

Jahresfracht P_{ges} in kg/a	
--------------------------------	--

2.4. Welche Verfahren verwenden Sie zur Phosphor-Elimination aus dem Abwasser?

Name der Verfahren	
Wo werden die Verfahren eingesetzt?	

2.5. Wann wurden die Verfahren eingeführt?

Fällung	
Bio-P	
Filtration	
Sonstige	

2.6. Wie hoch waren die Investitionskosten? (falls die einzelnen Kosten nicht vorhanden sind, reichen die Gesamtkosten aus)

Dosierstation	
Analysetechnik	
Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik	
Um- und Neubauten	
Filtrationsanlagen	
Sonstige Einrichtungen	

Gesamtkosten der Anschaffung und Installation	
Fällung	
Bio-P	
Filtration	
Sonstige	

2.7. Wie hoch sind die Betriebskosten für die Fällung (pro Jahr)?

Fällmittel: Art und Menge	
Angesetzte β -Werte	
Spezifische Fällmittelkosten inkl. Lieferung	
Reparatur-, Wartungs- und Unterhaltungskosten	
Gesamtkosten	

2.8. Wo befindet sich die Dosierstelle?

Ort der Dosierstelle	
----------------------	--

2.9. Wie hoch sind die Betriebskosten für die Bio-P pro Jahr?

Gesamtkosten pro Jahr	
-----------------------	--

2.10. Wie hoch sind die Betriebskosten für die Filtration pro Jahr?

Filter	
Reparatur-, Wartungs- und Unterhaltungskosten	
Gesamtkosten	

2.11. Welche P-Eliminationsleistung kann in den jeweiligen Verfahrensschritten erreicht werden?

Verfahrensschritt	P-Eliminationsleistung in %		
	Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert
Vorklärung			
Bio-P			
Fällung			
Filtration			
Gesamt-Eliminationsleistung der Kläranlage			

2.12. Wie sind die Erfahrungen mit den Verfahren?

Störanfälligkeit	
Betriebsprobleme	
Verbesserungsvorschläge	
Sonstige	

3. Fragen zum Bereich Klärschlamm/Faulschlamm:

Alle einzutragenden Werte bitte für das Jahr 2012 angeben!

3.1. Verwenden Sie Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus dem Faulschlamm (z.B. AirPrex-MAP Verfahren, Stuttgarter Verfahren)?

Ja Nein

Oder wird der Klärschlamm zu einem externen Betrieb transportiert, wo das Phosphat zurückgewonnen wird?

Ja Nein

→ wenn beides nicht zutrifft, kann dieser Abschnitt ausgelassen werden.

→ wenn ja: Bitte Fragen zu diesem Kapitel beantworten.

Name des Verfahrens und kurze Beschreibung	
Wo wird das Verfahren eingesetzt?	
Name und Adresse des externen Betriebs zur P-Rückgewinnung und Art des Verfahrens	

3.2. Wann wurde das Verfahren eingeführt und wie teuer war die Anschaffung und Installation?

Verfahren	Datum der Inbetriebnahme	Anschaffungskosten

3.3. Wie hoch sind die Betriebskosten/Unterhaltungskosten des Verfahrens?

Art der Chemikalien	
Verbrauch an Chemikalien (pro Jahr)	
Verbrauch von sonstigen Stoffen für das Verfahren	
Energiekosten	
Reparatur-, Wartungs- und Unterhaltungskosten	
Gesamt-Betriebskosten pro Jahr	

3.4. Welche P-Rückgewinnungsraten in % können aus dem Faulschlamm erzielt werden?

	Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert
P-Rückgewinnungsraten in %			

3.5. Wie wirtschaftlich arbeitet das Verfahren?

Wird ein Produkt gewonnen (z.B. MAP), dass verkauft werden kann?	
Ist der Erlös aus dem Produkt positiv, negativ oder kostenneutral?	
Wird eine Verringerung der Abwasserabgabe erreicht? (wie viel?)	
Besteht ein enormer Mehraufwand?	

3.6. Wie sind die Erfahrungen mit dem Verfahren?

Störanfälligkeit	
Betriebsprobleme	
Qualität des gewonnenen Produkts (z.B. Pflanzenverfügbarkeit)	
Verbesserungsvorschläge	

3.7. Wie teuer ist die Herstellung von 1 kg sekundär gewonnenen Phosphor (z.B. MAP)?

Kosten für Herstellung von 1kg sekundär gewonnenen Phosphor	
---	--

3.8. Welche Menge an sekundär gewonnenen Phosphor wird im Mittel pro Jahr zurückgewonnen?

Menge an sek. gewonnenen P in kg/a	
------------------------------------	--

4. Fragen zum Bereich Schlammwasser:

Alle einzutragenden Werte bitte für das 2012 angeben!

4.1. Verwenden Sie Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus dem Schlammwasser (z.B. RecoPhos, PHOSTRIP)?

Ja Nein

Oder wird das Schlammwasser zu einem externen Betrieb transportiert, wo das Phosphat zurückgewonnen wird?

Ja Nein

→ wenn beides nicht zutrifft, kann dieser Abschnitt ausgelassen werden.

→ wenn ja: Bitte Fragen zu diesem Kapitel beantworten

Name des Verfahrens und kurze Beschreibung	
Wo wird das Verfahren eingesetzt?	
Name und Adresse des externen Betriebs zur P-Rückgewinnung und Art des Verfahrens	

4.2. Wann wurde das Verfahren eingeführt und wie teuer war die Anschaffung und Installation?

Verfahren	Datum der Inbetriebnahme	Anschaffungskosten

4.3. Wie hoch sind die Betriebskosten/Unterhaltungskosten des Verfahrens?

Art der Chemikalien	
Verbrauch an Chemikalien (pro Jahr)	
Verbrauch von sonstigen Stoffen für das Verfahren	
Energiekosten	
Reparatur-, Wartungs- und Unterhaltungskosten	
Gesamt-Betriebskosten pro Jahr	

4.4. Welche P-Rückgewinnungsraten in % können aus dem Schlammwasser erzielt werden?

	Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert
P-Rückgewinnungsraten in %			

4.5. Wie sind die Erfahrungen mit dem Verfahren?

Störanfälligkeit	
Betriebsprobleme	
Qualität des gewonnenen Produkts (z.B. Pflanzenverfügbarkeit)	
Verbesserungsvorschläge	

5. Sonstige Verfahren

5.1. Verwenden Sie sonstige Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung, die in dem Fragebogen nicht aufgeführt wurden?

Name und kurze Beschreibung des Verfahrens	
--	--

5.2. Bestehen bereits Pläne ein Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung (aus der wässrigen oder der Schlammphase) in Zukunft an Ihrer Kläranlage einzuführen?

Welches Verfahren und voraussichtlicher Zeitpunkt der Anschaffung	
---	--

5.3. Wissen Sie von anderen Kläranlagen oder Betrieben in Hessen, die eine P-Rückgewinnung betreiben?

Name und Adresse des Betriebs	
-------------------------------	--

Fragebogen für Klärschlammmonoverbrennungsanlagen

1. Allgemein

Alle Angaben bitte für das Jahr 2012!

1.1. Angaben zur Klärschlammverbrennungsanlage

Name und Betreiber der Anlage	
Adresse der Anlage	
E-Mail Adresse	

1.2. Welche Menge an Klärschlamm wird pro Jahr angeliefert und behandelt?

Menge in t/a	
--------------	--

1.3. Wie ist der TS-Gehalt?

TS-Gehalt in %	
----------------	--

1.4. Herkunft des Klärschlammes (kommunal oder industriell)?

Herkunft Klärschlamm	
----------------------	--

1.5. Erfolgt vor der Verbrennung eine Vorbehandlung des Klärschlammes (z.B. Trocknung)?

Kurze Beschreibung der Vorbehandlung	
--------------------------------------	--

1.6. Wie hoch ist der Phosphorgehalt der Asche und das Phosphor-Rückgewinnungspotential?

	Minimum	Maximum	Mittelwert
Phosphorgehalt in kg/t			
Rückgewinnungspotential in %			

1.7. Wie hoch sind die Betriebskosten und der Energieverbrauch für die Verbrennung von 1 Tonne Klärschlamm?

Betriebskosten in €/t	
Energieverbrauch in kWh/t	

1.8. Welche Entsorgungswege werden für die Klärschlammasche benutzt (z.B. Deponie, Landschafts- oder Straßenbau, Düngemittel)?

Entsorgungswege und jeweilige Mengen in t/a	
---	--

2. Fragen zur Klärschlammasche

Alle einzutragenden Werte bitte für das Jahr 2012!

Verwenden Sie Verfahren zur Phosphor-**Rückgewinnung** aus der Klärschlammasche?

Ja Nein

➤ Falls Ja, bitte Fragen zu diesem Kapitel beantworten.

Oder wird die Asche an eine externe Firma geliefert, die das Phosphat zurückgewinnt?

Ja Nein

➤ Falls Ja, bitte Name und Adresse der Firma sowie eine kurze Beschreibung des Verfahrens angeben:

Name und Adresse der Firma	
Kurze Beschreibung des Verfahrens	

➤ Falls beides nicht zutrifft, ist dieser Abschnitt nicht zu beantworten. Bitte weiter ab Abschnitt 3.

2.1. Welches Verfahren wird zur P-Rückgewinnung angewendet und Beschreibung der Verfahrensschritte:

Art und Name des Verfahrens	
Kurze Beschreibung der Verfahrensschritte	

2.2. Investitionskosten für die Anlage

Investitionskosten für das Verfahren zur P-Rückgewinnung in €	
Investitionskosten der gesamten Anlage in €	

2.3. Wie hoch sind die Betriebskosten und der Energieverbrauch für die P-Rückgewinnung aus 1 t Asche?

Betriebskosten in €/t	
Energieverbrauch in kWh/t	

2.4. Wie viel Energie wird durch die Verbrennung von 1 t Klärschlamm zurückgewonnen (evtl. Deckung des Energieverbrauchs der P-Rückgewinnung durch die Schlammverbrennung)?

Energiegewinn aus 1 t Klärschlamm in kWh	
--	--

2.5. Wie hoch sind die Herstellungskosten für 1 kg sekundär gewonnenem Phosphat?

Herstellungskosten pro kg Phosphat in €	
--	--

2.6. Welche Menge an Phosphat wird jährlich zurückgewonnen?

Zurückgewonnene Menge in t/a	
---------------------------------	--

2.7. Wie hoch ist der Erlös aus dem Produkt?

Erlös in €/a	
--------------	--

2.8. Welche Stoffe werden für den Rückgewinnungs-Prozess benötigt, sowie die Mengen und Kosten?

Benötigte Stoffe	
Jeweilige Menge in t/a	
Jeweilige Kosten in €/a	

2.9. Welche Schadstoffe können während des Prozesses abgetrennt werden bzw. welche Schadstoffe bleiben im Produkt enthalten (Art und Gehalt)?

Art der abgetrennten Schadstoffe	
Menge in kg/a	
Verbleibende Schadstoffe im Produkt	
Gehalt in mg/kg	

2.10. Welche Eigenschaften hat das gewonnene Produkt (Pflanzenverfügbarkeit, Düngereffizienz...)?

Bewertung der Pflanzenverfügbarkeit	
Bewertung der Düngereffizienz	

2.11. Wie sind die Erfahrungen mit dem Verfahren?

Betriebsprobleme	
Störanfälligkeit	
Nachteile	
Generelle Erfahrung	

2.12. Was ist in dem Reststoff/Abfallstoff enthalten und wie wird dieser entsorgt?

Stoffliche Zusammensetzung des Reststoffs/Abfallstoffs	
Entsorgungsweg	

3. Abschließende Fragen

3.1. Bestehen bereits Pläne ein Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung aus der Klärschlammasche in Zukunft an Ihrer Anlage einzuführen?

Welches Verfahren und voraussichtlicher Zeitpunkt der Anschaffung	
---	--

3.2. Wissen Sie von anderen Anlagen oder Betrieben in Hessen, die eine P-Rückgewinnung aus Aschen betreiben?

Name und Adresse des Betriebs	
-------------------------------	--

Danksagung

Danken möchte ich in erster Linie meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Volker Kummer, für seine ausgiebige Unterstützung. Als unablässiger Ansprechpartner konnte er mir stets in meiner Recherche und bei meinen Fragen weiterhelfen. Sein fachliches Wissen verhalf mir, Details zu verstehen und das Augenmerk auf die wesentlichen Aspekte zu lenken. Vielen Dank für die Zeit und Mühen, die Sie, Herr Kummer, in meine Arbeit investiert haben.

Auch danke ich Frau Prof. Dr. Ursula Katharina Deister und Herrn Dr. Thomas Schmid, die stets Rücksprache mit mir hielten, mich unterstützten und meinen Fortschritt verfolgten.

Abschließend möchte ich noch meinen Eltern dafür danken, dass sie mich während der gesamten Studienlaufbahn uneingeschränkt unterstützt haben.



Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen.

Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Ort, Datum und Unterschrift (Andreas Höhne)